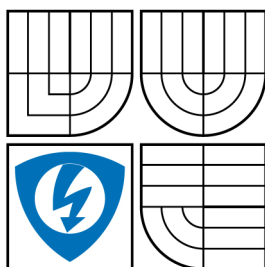


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION**

SLEDOVÁNÍ MALÝCH ZMĚN OBJEKTŮ DETECTION OF LITTLE CHANGES

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JIŘÍ ČÍRTEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MILOSLAV RICHTER, Ph.D.

BRNO 2008

ANOTACE

Diplomová práce se zabývá problematikou určení poloh hran s přesností větší než jeden obrazový bod (pixel). V rámci zadání této diplomové práce byl vytvořen program, generující tři různé tvary objektů. Na základě změny parametrů v programu je na daných objektech vstupního obrazu měřena poloha jejich těžiště se subpixelovou přesností. Naměřené hodnoty odchylek poloh těžišť jsou vykresleny do grafů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Subpixelová přesnost, Detekce hran, Houghova transformace

ABSTRACT

This diploma thesis inspects problems with specification location of edges with higher accuracy than one pixel (subpixel accuracy). In terms of this assignment has been created program, which generates three different shapes of objects. With change of parameters in program is measuring location of gravitational center on objects with subpixel accuracy. Obtained data of gravitational center deviations are depicted in graphs.

KEY WORDS

Subpixel accuracy, Detection of edges, Hough transform

Bibliografická citace

Čírtek, Jiří. *Sledování malých změn objektů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. s., příloh. Ing. Miloslav Richter, Ph.D.

P r o h l á š e n í

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma " SLEDOVÁNÍ MALÝCH ZMĚN OBJEKTŮ

" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

V Brně dne :

Podpis:

P o d ě k o v á n í

Děkuji tímto Ing. Miloslavu Richterovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování této diplomové práce.

V Brně dne :

Podpis:

1. OBSAH

1. OBSAH.....	1
2. SEZNAM OBRÁZKŮ.....	3
3. ÚVOD	4
4. TEORIE ZPRACOVÁNÍ OBRAZU	6
4.1 Snímání a digitalizace obrazu.....	6
4.1.1 Snímání obrazu.....	6
4.1.2 Digitalizace	7
4.2 Předzpracování obrazu	9
4.3 Segmentace.....	10
4.4 Popis objektů	10
4.5 Klasifikace.....	11
5. HOUGHOVA TRANSFORMACE	12
5.1 Implementace Houghovy transformace	12
5.2 Shrnutí.....	16
6. METODA NEJMENŠÍCH ČTVERCŮ.....	17
7. CCD SNÍMAČ.....	18
8. IMPLEMENTACE	20
8.1 Subpixelové určení hranice	20
8.2 Diskretizace	20
8.3 Nalezení inflexního bodu druhé derivace	21
8.4 Aproximace diskrétních hodnot	23
9. PROGRAM	24
9.1 struktura programu.....	25
9.1.1 Funkce <i>main.m</i>	27
9.1.2 Funkce generující objekty (<i>vzory.m</i>)	27
9.1.3 Funkce provádějící diskretizaci (<i>pixelování.m</i>)	28
9.1.4 Rozmazání originálního obrazu (<i>konvoluce.m</i>).....	29
9.1.5 Rozvětvení na funkce jednotlivých tvarů	31
9.2 Hledání polohy těžiště objektu	32

10. VÝSLEDKY.....	34
10.1čtverec	37
10.1.1 Rozlišení 4x4.....	37
10.1.2 Rozlišení 5x5.....	38
10.2Kolečko	39
10.3Trojúhelník	40
10.3.1 Rozlišení 4x4.....	40
10.3.2 Rozlišení 5x5.....	41
11. ZÁVĚR	42
12. LITERATURA	44

2. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Řetězec zpracování obrazu.....	6
Obr. 2. Příklad převodu analogového signálu na digitální [http://www.mascom.cz/digital/dc5.htm]	7
Obr. 3. Hexagonální a čtvercová vzorkovací mřížka	8
Obr. 4. Pravoúhlý rastr 4sousedství, 8sousedství a hexagonální rastr 6sousedství	9
Obr. 5. Houghova transformace [7]	13
Obr. 6. Houghův prostor [7].....	14
Obr. 7. Houghova transformace.....	15
Obr. 8. Metoda nejmenších čtverců	17
Obr. 9. CCD čip s čočkami směřujícími světlo na citlivou oblast snímače	18
Obr. 10. Příklad snímání obrazu CCD čipem	19
Obr. 11. Navzorkovaný signál přechodu mezi úrovněmi jasu 0 – 255.....	21
Obr. 12. a) spojitý signál (modře), b) druhá derivace (červeně)	22
Obr. 13. Průchod nulovou hodnotou	23
Obr. 14: Sousedství 3x3 pixelů zobrazující hranu	23
Obr. 15 Blokové schéma postupu zpracování obrazu.....	25
Obr. 16. Ovládací panel programu	26
Obr. 17. Vygenerované objekty funkcí <i>vzory.m</i>	27
Obr. 18. Navzorkování obrazu rozlišením 3x3, (velikost pixelu snímače odpovídá 3x3 obrazovým bodů originálního obrazu).....	28
Obr. 19. Diskretizace s kanálem.....	29
Obr. 20. Gaussovo rozložení o rozptylu $\sigma = 0.75$	30
Obr. 21. Rozmazání Gaussovým filtrem	30
Obr. 22: Průběh ostré a rozmazané hrany (nahore), průběh jejich druhé derivace (dole).....	31
Obr. 23. Vykreslení nalezených stran a os do obrazu	33
Obr. 24. Rotace objektu od 1° do 360°	35
Obr. 25. Histogram odchylek. Rozmazaný červeně, ostrý modře.....	35
Obr. 26. Čtverec, rozlišení 4x4 pixely.....	37
Obr. 27. Čtverec, rozlišení 5x5 pixelů	38
Obr. 28. Posun kolečka o vzdálenost 0 – 6 pixelů.....	39
Obr. 29. Trojúhelník, rozlišení 4x4 pixelů.....	40
Obr. 30. Trojúhelník, rozlišení 5x5 pixelů.....	41

3. SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Průměrné odchylky pro Čtverec..... 38

Tab. 2: Průměrné odchylky pro Trojúhelník..... 41

4. ÚVOD

Hledání hran objektů je jedna ze základních operací počítačového vidění, spadající do kroku segmentace v řetězci zpracování obrazu.

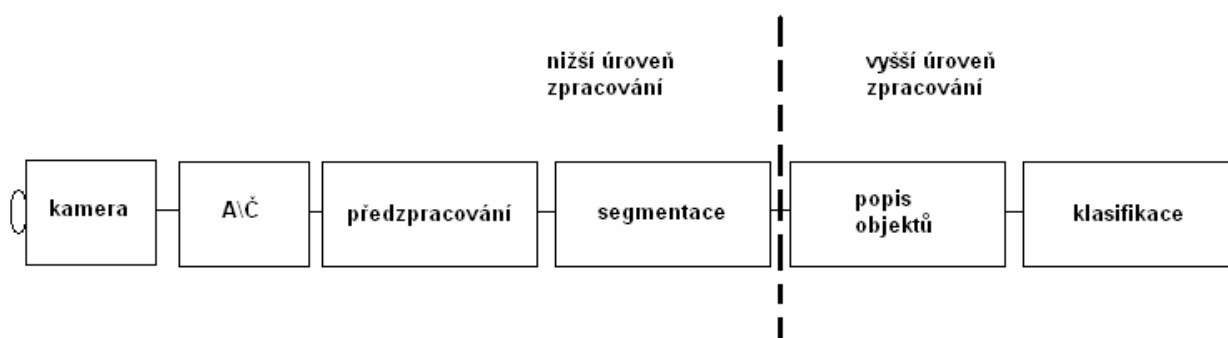
Cílem segmentace objektu, je oddělit hledaný objekt od pozadí a určit jeho polohu v obraze. Existují různé typy úloh, s různými požadavky na přesnost. U některých úloh není požadavek na přesnost nalezení hran objektu nijak zvlášť velký a spokojí se s přesností udávanou v jednotkách pixelů. Na druhou stranu existují úlohy, které naopak přímo vyžadují přesnost nalezení hrany objektu co největší. Jedním příkladem za všechny je výstupní kontrola rozměrů výrobků ve strojním průmyslu, kde jsou běžné tolerance rozměrů v setinách až tisícinách milimetru.

Parametrem kamery určujícím přesnost měření je rozlišení (počet obrazových bodů, pixelů) jejího obrazového čipu. Použitím vhodného software je možné přesnost měření zlepšovat, i přes nedostatečné rozlišení obrazového čipu a je možno měření s přesností větší než jeden pixel (subpixelové měření).

V rámci této práce, bude vytvořen program, pracující se třemi různými tvary objektů, na kterých jsou hledány hrany a z těch posléze určena poloha jejich těžiště s co největší přesností. Na základě naměřených hodnot bude vyhodnocena míra dosažitelné přesnosti určení polohy středu daných objektů.

5. TEORIE ZPRACOVÁNÍ OBRAZU

Průběh zpracování a rozpoznávání obrazu reálného světa se dá rozdělit do několika základních kroků. Toto rozdělení není zcela jednoznačné a může se v různé literatuře mírně lišit. Na obrázku Obr. 1 je blokově zobrazen řetězec pro zpracování obrazu.



Obr. 1. Řetězec zpracování obrazu

Posloupnost základních kroků zpracování obrazu:

- Snímání a digitalizace obrazu
- Předpracování obrazu
- Segmentace obrazu
- Popis objektů
- Klasifikace

5.1 SNÍMÁNÍ A DIGITALIZACE OBRAZU

V těchto krocích zpracování obrazu je získán obraz z reálného světa a následně převeden do digitální formy vhodné pro uložení a další zpracování.

5.1.1 Snímání obrazu

Snímáním obrazu je převedena optická veličina na elektrický signál, spojitý v čase i úrovni. Na kvalitu získaného obrazu má vliv mnoho dalších faktorů. Mezi tyto faktory patří například, osvětlení snímaného objektu, světelná odrazivost

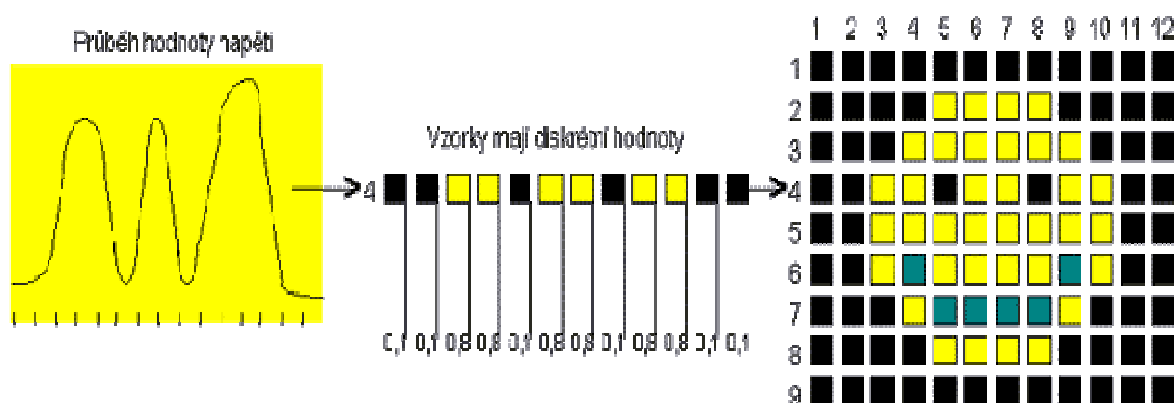
povrchu objektu, kvalita objektivu, vzájemný pohyb objektu vůči kameře a kamery vůči objektu, kvalita a typ snímacího čipu.

Pokud jsou předem známy některé tyto vlivy, dají se zpětně částečně vykompenzovat. Výstupní informací při snímání mohou být kromě jasu z kamery či skeneru i jiné veličiny, jako je rentgenové záření, ultrazvuk či tepelné záření.

5.1.2 Digitalizace

Druhým krokem, ve kterém je převeden spojitý analogový signál na signál digitální (*digitalizace*), získáváme obraz vhodný pro další zpracování.

Digitální obraz je ekvivalentem spojitě obrazové funkce $f(i,j)$, kde i a j jsou souřadnice v prostoru. Je získán pomocí vzorkování obrazu do matice $M \times N$ bodů a kvantování do K úrovní. Zásady vzorkování se musí řídit podle Shannonova vzorkovacího teorému, který říká, že nejmenší detail v digitálním obraze musí být minimálně dvojnásobkem vzorkovacího intervalu. Při volbě špatného rozlišení obrazu může dojít u příliš nízkého rozlišení ke ztrátám důležitých informací o detailech obrazu a naopak při příliš vysokém rozlišení bude zbytečně narůstat výpočetní náročnost při dalším zpracování. Velikost obrazu se uvádí v obrazových bodech – *pixelech*. Rozlišení se udává v jednotkách pixel na palec = Pixel per Inch = PPI.

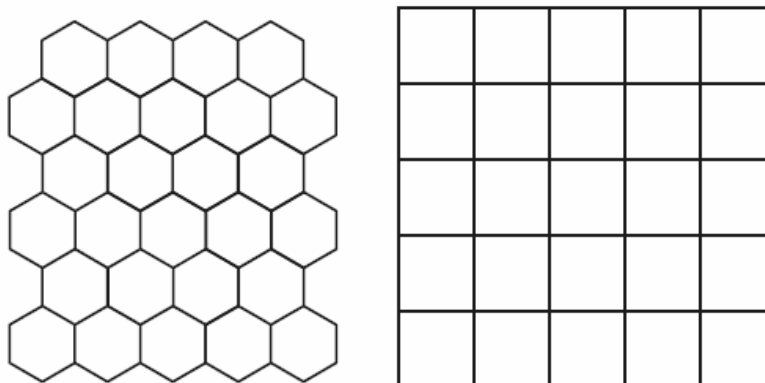


Obr. 2. Příklad převodu analogového signálu na digitální

[<http://www.mascom.cz/digital/dc5.htm>]

Na Obr. 2 je naznačen převod analogového signálu na signál digitální. Velikost napětí, udávající jas obrazového bodu je převedena na číselnou hodnotu. Pro dosažení kvalitního rozlišení, je třeba větší počet pixelů na řádek. Pro plynulý přechod mezi úrovněmi bílá a černá, je třeba větší počet kvantovacích úrovní. Pro plynulý dojem je požadováno 256 úrovní šedi.

Dalším podstatným elementem při digitalizaci obrazu je použitá vzorkovací mřížka. Na Obr. 3 vidíme dva nejrozšířenější druhy vzorkovacích mřížek (hexagonální a čtvercová), dále se ještě vyskytuje například trojúhelníková vzorkovací mřížka. Většina snímacích prvků je realizována tak, že odpovídá čtvercovému rozložení. Nevýhody čtvercového uspořádání spočívají především v měření vzdálenosti a spojitosti objektů. Hexagonální mřížka není vhodná pro operace jako je např. Fourierova transformace.



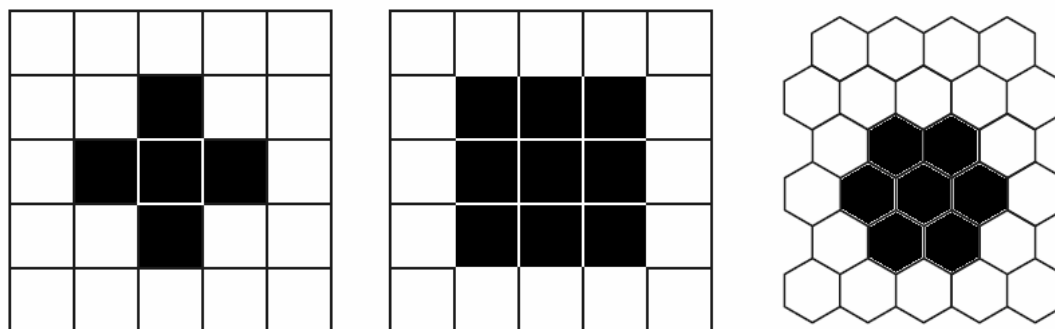
Obr. 3. Hexagonální a čtvercová vzorkovací mřížka

Pro získání vzdálenosti dvou obrazových bodů daných souřadnicemi (i,j) a (x,y) , se vychází z Eukleidovské vzdálenosti D_E , definované následujícím vztahem:

$$D_E = \sqrt{(x-i)^2 + (y-j)^2}. \quad 5-1$$

V diskretizovaném prostoru, je třeba definovat nejprve sousedství bodu a pak vzdálenost bodů v obraze za předpokladu daného sousedství. Při použití čtvercové vzorkovací mřížky existuje sousedství čtyř, nebo osmi obrazových bodů (Obr. 4). Hexagonální mřížka zaručuje sousedství šesti obrazových bodů. Pro využití prostoru

se jeví hexagonální struktura jako optimální a zároveň každý bod má stejnou vzdálenost od všech svých sousedů. Avšak zpracování takových struktur přináší některé obtíže. Tato struktura je totožná se strukturou oční sítnice.



Obr. 4. Pravoúhlý rastr 4sousedství, 8sousedství a hexagonální rastr 6sousedství

Vzdálenosti pro 4 a 8 sousedních obrazových bodů jsou definovány následovně:

$$D_4 = |x - i| + |y - j|$$

$$D_8 = \max\{|x - i|, |y - j|\}.$$

5-2

5.2 PŘEDZPRACOVÁNÍ OBRAZU

Předzpracování obrazu je zcela nezbytnou operací, která se musí provést u všech zpracovávaných obrazů, pokud není obraz získán za ideálních podmínek.

Důvod je ten, že se nikdy nepodaří získat reálný, zcela kvalitní obraz za optimálních světelných podmínek, bez jakýchkoli šumových signálů a jiného rušení.

Do skupiny předzpracování patří operace realizující úpravy kontrastu a jasu, filtrace za účelem zaostření obrazu, potlačení šumu či operace zmenšení, zvětšení, otočení nebo posunu.

Dělení metod předzpracování:

- | | |
|-------------------------------|--|
| 1. Bodové jasové transformace | - jasová korekce
- transformace jasové stupnice |
| 2. Geometrické transformace | - plošná transformace
- jasová transformace |
| 3. Lokální předzpracování | - vyhlazování obrazu
- detekce hran, ostření |
| 4. Restaurace obrazu | |
| 5. Matematická morfologie | |

5.3 SEGMENTACE

V kroku segmentace se zpracuje obraz takovým způsobem, že se oddělí zkoumaný objekt od dalších částí obrazu, např. od pozadí a přichystá se pro další krok. Cílem je analýza obrazu, která vede k nalezení zkoumaných objektů v obraze. Objekt, je část obrazu, která bude v dalším průběhu zpracování středem největšího zájmu. Typickou metodou segmentace obrazu je prahování, déle to může být detekce bodu, přímek, hran, nalezení hranice objektů nebo oblastí.

5.4 POPIS OBJEKTŮ

Popisem objektů se rozumí, vyjádřit nějakým způsobem vlastnosti daného objektu. Pro popis objektu jsou na výběr dvě možnosti. První možností je popis založený na kvantitativním přístupu, což znamená popis objektů pomocí souboru číselných charakteristik. Tyto mohou být například velikost objektu, kompaktnost apod. Kvalitativní přístup je druhou možností, zde je popsána relace mezi objekty a jejich tvarové vlastnosti. Způsob by měl být volen vždy tak, k jakému účelu je dále využít. Většinou je tento popis vstupní informací pro rozpoznávání (*klasifikace*) objektů.

5.5 KLASIFIKACE

Konečným krokem při zpracování obrazu je *klasifikace* (rozpoznávání obrazu). Většinou jde o zařazení objektů nalezených v obraze do skupiny předem známých tříd. Pro klasifikaci objektů se mohou používat metody založené na bázi strojového učení či neuronových sítích. Metody klasifikace jsou děleny do dvou základních skupin, které jsou úzce spjaty se způsobem popisu objektů. Do těchto dvou základních skupin je řazeno příznakové a strukturální rozpoznávání. Strukturální metody jsou založeny na využití kvalitativního popisu objektu jako vstupu. Objekty jsou zde popsány primitivy. Dále je definována abeceda, jazyk popisu a gramatiky jednotlivých tříd. Rozpoznávání je dále postaveno na principu rozboru slova a kontroly správnosti syntaxe pro všechny třídy. Příznakové metody využívají principu příznaků, což je skupina číselných charakteristik objektu.

Učení klasifikátoru může být s trénovací množinou i bez ní, založené na principu shlukové analýzy.

6. HOUGHOVA TRANSFORMACE

Původně byla Houghova transformace používána pro identifikaci přímek v obraze, ale později byla její funkce rozšířena i na identifikaci pozice různých tvarů, například kruhu nebo elipsy. Nejčastěji je Houghova transformace využívána v oborech jakými jsou analýza obrazu, počítačové vidění a zpracování digitálního obrazu. Funkcí Houghovy transformace v praxi, je hledání obrazových primitiv.

V nejjednodušším případě je Houghova transformace používána pro detekci rovných přímek. Přímka může být popsána směrnicovou rovnicí $y = ax + b$, avšak tímto zápisem nelze popsat přímku rovnoběžnou s osou y . Houghova transformace se snaží popsat přímku v parametrickém tvaru. Z výpočetních důvodů je přímka parametrizována v Houghově transformaci dvěma parametry, obecně značeny jako ρ a θ . Parametr ρ reprezentuje vzdálenost přímky od počátku (bod $[0,0]$) a parametr θ udává úhel, jaký svírá přímka s osou x . Použitím tohoto popisu lze přímku vyjádřit rovnicí

$$y = \left(-\frac{\cos \theta}{\sin \theta} \right) x + \left(\frac{\rho}{\sin \theta} \right) \quad 6-1$$

kteřou lze přepsat do tvaru $\rho = x \cos \theta + y \sin \theta$.

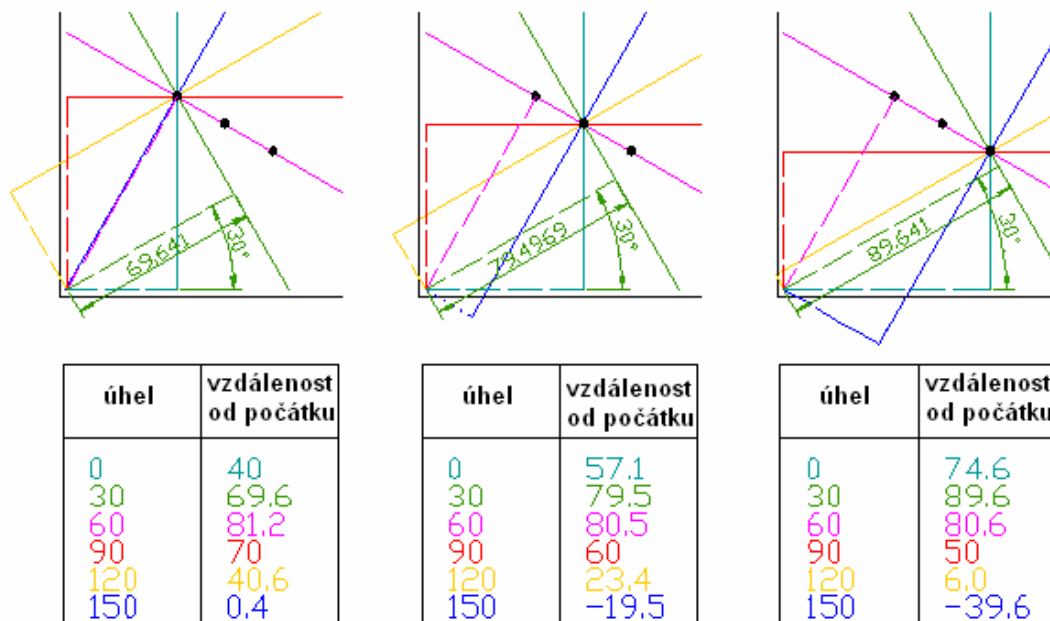
Proto je to možné přidružit ke každé čáře obrázku, několik (ρ, θ) , které jsou jedinečné jestliže $\theta \in [0, p]$ a $\rho \in R$, nebo jestli $\theta \in [0, 2p]$ a $\rho \geq 0$. (ρ, θ) .

6.1 IMPLEMENTACE HOUGHOVY TRANSFORMACE

Algoritmus Houghovy transformace používá pole, které se nazývá akumulátor a slouží k detekci existence přímky $y = ax + b$. Rozměry akumulátoru jsou rovny velikosti neznámých parametrů Houghovy transformace.

Hledané parametry přímky jsou získány následujícím způsobem. Na obrázku je zobrazen příklad transformace.

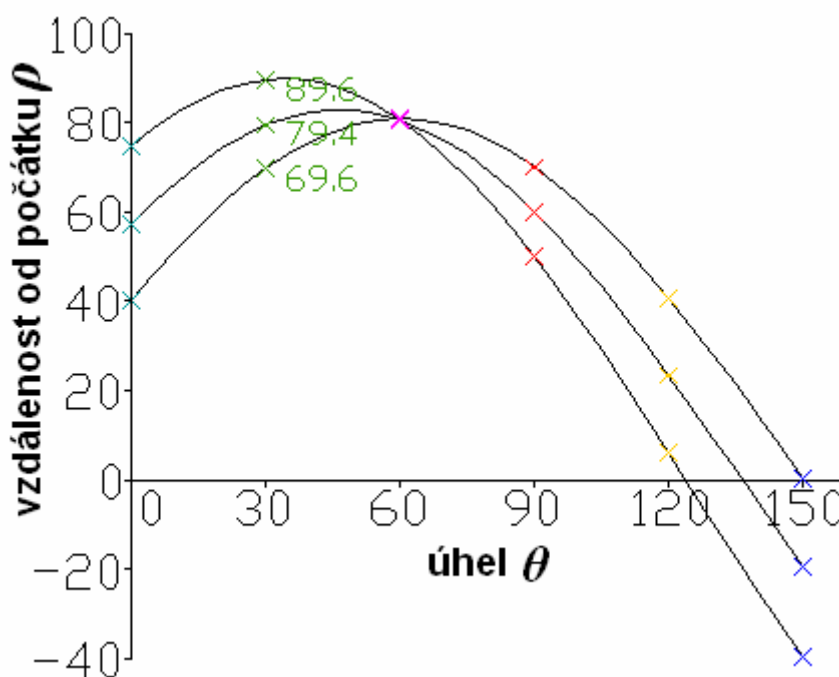
Jsou dány body, tvořící přímku. Podle pravidel Houghovy transformace se vezme každý bod zvlášť a provádí se s ním následující operace, jak je naznačeno na Obr. 5.



Obr. 5. Houghova transformace [7]

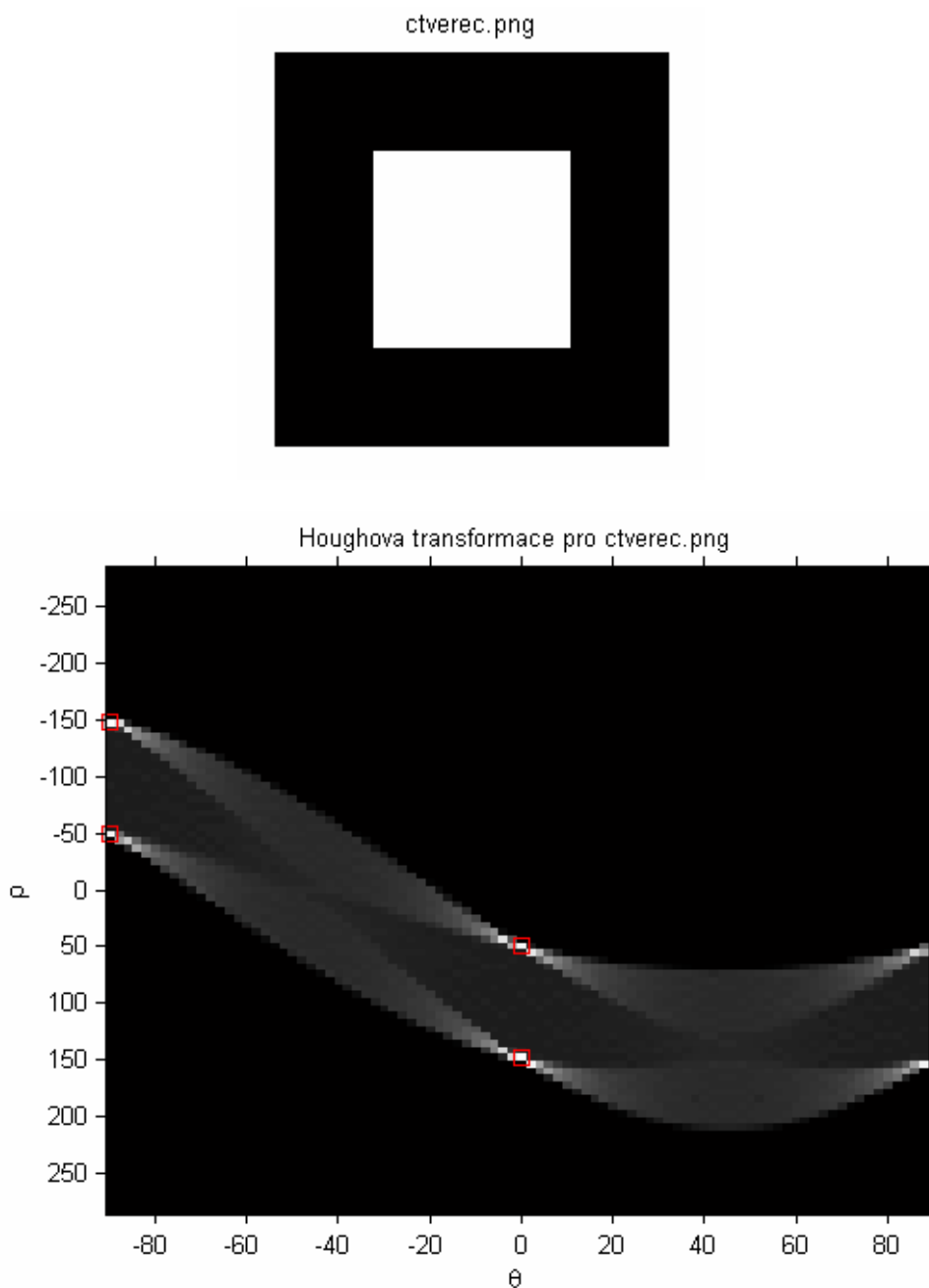
- . Bod je proložen přímkou, která je natáčena od 0 do 360stupňů (postačí otáčet přímkou od 0 do 180stupňů, protože po 180stupních se hodnoty opakují).
- V každém kroku otočení přímky je spuštěna kolmice od přímky k počátku souřadnic (bod [0,0]). Na Obr. 5 vyznačeno přerušovanou čarou.
- Vzdálenost, která odpovídá délce kolmice, od bodu [0,0] k průsečíku s přímkou, je rovna parametru ρ . Úhel, který svírá kolmice s osou x, je roven druhému z parametrů θ .
- V tabulce pod obrázky jsou pod sebou vypsány hodnoty vzdálenosti ρ pro šest různých úhlů θ , provedeno na třech bodech.

- Získané hodnoty θ a ρ jsou poté převedeny do Houghova prostoru, jak je naznačeno na Obr. 6. Převod do Houghova prostoru se provádí tím způsobem, že se najde bod odpovídající hodnotě θ na x-ové ose a ρ na y-ové ose a jeho hodnota je zvýšena o 1.
- Pokud je tato operace provedena pro všechny vyšetřované body, pak bude mít v Houghově prostoru nejvyšší hodnotu ten bod, který odpovídá svými souřadnicemi θ a ρ , parametřům přímky procházející co největším počtem vyšetřovaných bodů.



Obr. 6. Houghův prostor [7]

Na Obr. 7 je Houghova transformace použita v praxi, obrázek čtverce je zde převeden Houghovou transformací do prostoru θ a ρ . Na obrázku jsou v Houghově prostoru vyznačeny nejsvětlejší body, které odpovídají hranám čtverce.



Obr. 7. Houghova transformace

6.2 SHRUTÍ

Výhody:

- Houghova transformace dokáže pracovat i s nespojitými, nebo přerušenými hranami
- Velice efektivní při hledání jednoduchých tvarů (přímka, kruh, atd.)
- Robustní metoda odolná vůči šumům

Nevýhody:

- Problém s přesností – čím je požadavek na větší přesnost, tím roste výpočetní náročnost. Lze kompenzovat nejprve vybráním zkoumané oblasti a na ní až přesnějším výpočtem
- Značně výpočetně náročná
- Nelze určit hranice hledaných křivek, výstupem jsou přímky namísto požadovaných úseček

7. METODA NEJMENŠÍCH ČTVERCŮ

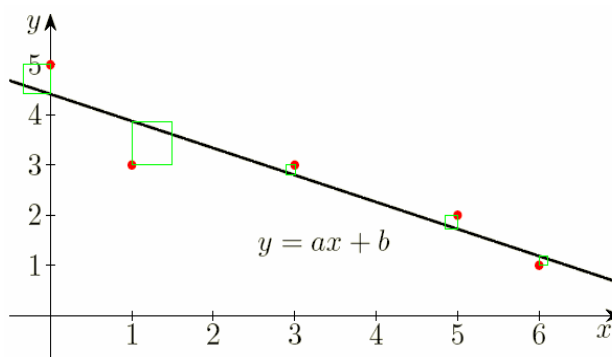
Použití metody nejmenších čtverců je vhodné v případě, kdy je dána množina bodů, které neleží na jedné přímce, ale je třeba ji přímkou proložit. Snaha je proložit všechny body takovým způsobem, aby se aproximační přímka blížila co možná nejvíce všem bodům. To znamená, aby odchylka aproximované přímky od bodů množiny byla co nejmenší. Metoda nejmenších čtverců počítá s rozdílem kvadrátu odchylek. Snaží se najít takové řešení, aby součet čtverců odchylek byl co nejmenší.

Rovnice přímky má tvar $y = ax + b$, vztahy pro výpočet koeficientů neoptimálnější přímky jsou následující.

$$a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i y_i, \quad 7-1$$

$$a \sum_{i=1}^n x_i + bn = \sum_{i=1}^n y_i, \quad 7-2$$

Nevýhodou této metody oproti aproximaci Houghovou transformací je to, že není odolná vůči šumu a náhodným hodnotám. Avšak co se týče výpočetní náročnosti, tak je mnohem jednodušší než Houghova transformace. Obr. 8 je příklad proložení pěti bodů přímkou. Zeleně jsou naznačeny čtverce odchylek bodů od aproximační přímky.

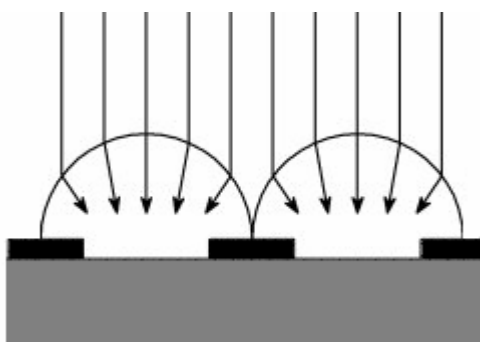


Obr. 8. Metoda nejmenších čtverců

8. CCD SNÍMAČ

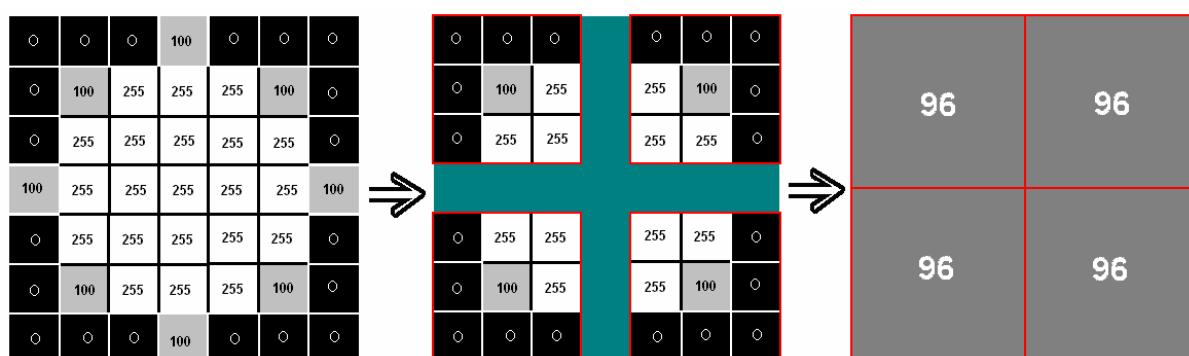
CCD snímač, jako asi momentálně nejlepší prvek převádějící světlo na elektrický signál, se hojně vyskytuje v různých obrazových snímacích prvcích. Nejčastěji v digitálních fotoaparátech, skenerech, kamerách, atd. Snímač využívá princip fotojevu, kdy dopadající foton při nárazu do atomu přemístí jeho elektron ze základního stavu. Na čipu je negativně nabitý systém vodorovných elektrod, vytvářející na čipu mřížku, ze které nemohou elektrony uniknout a jsou drženy v tzv. potenciálových studních. Potenciálová studna reprezentuje pixel snímače, který odpovídá nejmenšímu obrazovému bodu na výsledném snímku. Po přiložení napětí na elektrody, lze elektrony pohybovat z jedné nábojové struktury do sousední. Tímto způsobem je možné nábojem posouvat po ploše snímače, což je důležité pro vyčítání dat z CCD čipu.

Elektrody, umístěné mezi jednotlivými pixely, zabírají určitou malou část plochy na celkovém rozměru snímače, díky čemuž vznikají mezi sousedními pixely slepá místa. Foton dopadnuvší na toto slepé místo, není nijak zaznamenán a informace je ztracena. Někteří výrobci tuto situaci řeší tím způsobem, že na povrch každého pixelu umístí miniaturní čočku, která směřuje světlo dopadající na necitlivou část, směrem do oblasti, která je na světlo citlivá.



Obr. 9. CCD čip s čočkami směřujícími světlo na citlivou oblast snímače

Situace, kdy čip má mezi pixely necitlivá místa je simulována i v programu. Na Obr. 10 je naznačeno jakým způsobem je diskretizován obraz čipem, který má mezi jednotlivými pixely elektrody. V levé části obrázku je vyobrazen snímáný obraz, čísla odpovídají úrovni šedi v daném bodě. Na obrázku uprostřed, představuje každý červený rámeček, pixel snímacího čipu. Body uvnitř červeného rámečku představují úrovně jasu dopadající na plochu pixelu. V pravé části obrázku jsou čtyři červené čtverce, každý čtverec reprezentuje jeden pixel výsledného obrazu. Číslo odpovídá průměrné hodnotě jasu, jež dopadla na pixel snímače.



Obr. 10. Příklad snímání obrazu CCD čipem

9. IMPLEMENTACE

9.1 SUBPIXELOVÉ URČENÍ HRANICE

Určení hranic objektů patří v oboru zpracování obrazu do kroku segmentace. Spojitý obrazový signál je po diskretizaci převeden na signál digitální do konečné vzorkovací mřížky. Diskretizací je část informace z obrazu ztracena, avšak stále je možné určit hranu objektu s vyšší přesností než jeden pixel za pomoci polohy a jasových úrovní hraničních obrazových bodů.

Hrana je dána gradientem obrazové funkce. Popisuje rychlost změny a směr největšího růstu obrazové funkce.

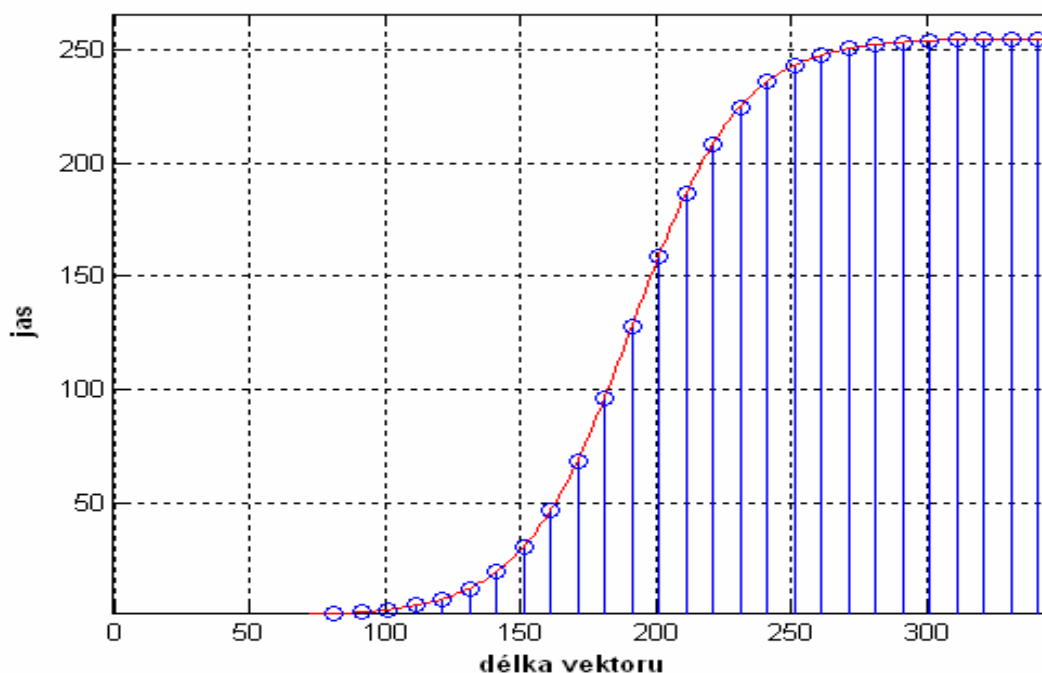
Hranové detektory lze rozdělit podle principu do třech skupin.

- Hledají maxima prvních derivací (Roberts, Prewittové, Sobel, Canny)
- Hledají průchody nulou druhých derivací (Marr-Hildreth)
- Lokální aproximace obrazové funkce parametrickým modelem, např. polynomem dvou proměnných

9.2 DISKRETIZACE

Obrázek Obr. 11 zobrazuje jeden řádek obrazové matice o $M \times N$ pixelech. Jednotlivé pixely nabývají úrovní od 0 do 255, v závislosti na tom, jak velký jas každý jeden pixel představuje. Z průběhu křivky na obrázku lze vyčíst, že se jedná

o přechod jasu od nejnižší úrovně 0 až po jas odpovídající hodnotě 255. Spojitý průběh je navzorkován danou periodou do následující podoby.

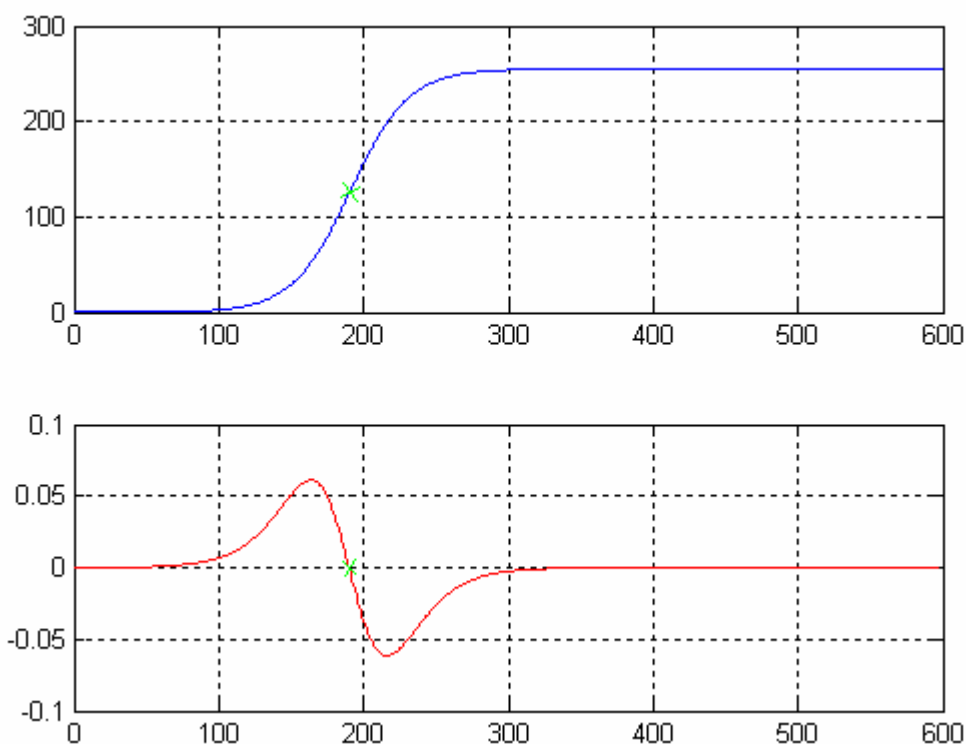


Obr. 11. Navzorkovaný signál přechodu mezi úrovněmi jasu 0 – 255

9.3 NALEZENÍ INFLEXNÍHO BODU DRUHÉ DERIVACE

Pro nalezení inflexního bodu křivky, je třeba provést na dané křivce druhou derivaci. V bodě, kde prochází křivka druhé derivace nulovou hodnotou je poloha inflexního bodu.

V horní části Obr. 12 je vykreslena spojitá křivka, pod kterou si lze představit hranu libovolného objektu. Křivka ve spodní části obrázku představuje její druhou derivaci. V bodě, kde protíná křivka druhé derivace osu x se nachází inflexní bod. Poloha inflexního bodu je zvýrazněna křížkem na obou obrázcích a představuje polohu, kde se nachází hrana hledaného objektu.



Obr. 12. a) spojitý signál (modře), b) druhá derivace (červeně)

Inflexní bod je bod, kterým prochází křivka druhé derivace nulovou hodnotou na x-ové ose. Jeho polohu lze určit jako vážený průměr hodnot vzorků $k(i) > 0$ a $k(i+1) < 0$, kde $k(i)$ je vzorek, který má jako poslední kladnou hodnotu a zároveň $k(i+1)$, jako vzorek následující s hodnotou zápornou.

Jak už bylo v předešlém řečeno, inflexní bod křivky se nachází v bodě, kde je druhá derivace nulová. Na obrázku (Obr. 13) je naznačena konkrétní situace, kdy první ze dvou vzorků má kladnou hodnotu, zatímco druhý nabývá záporné hodnoty.

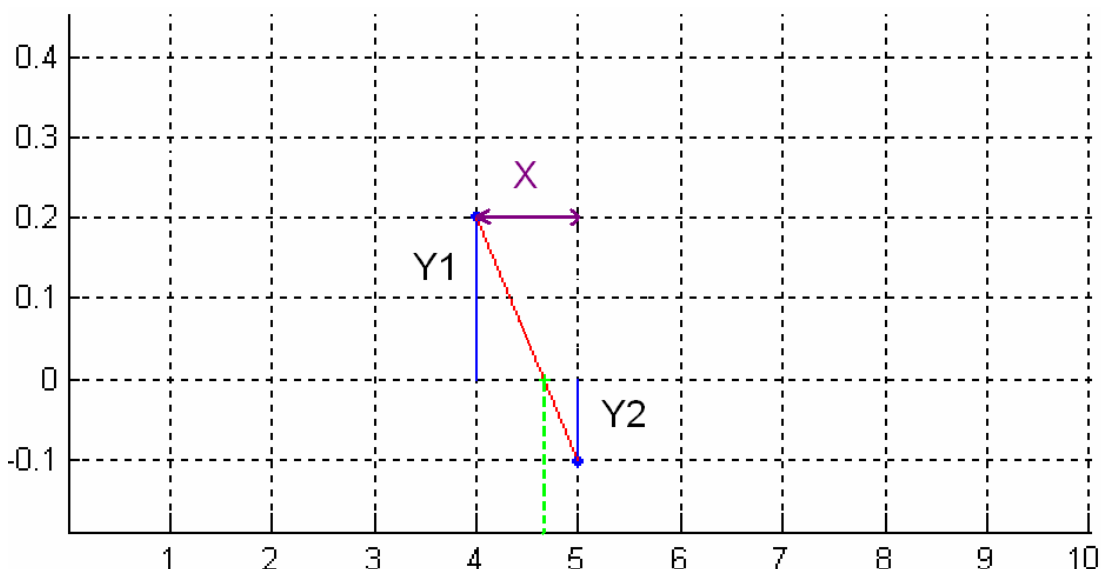
Bod, ve kterém protíná křivka nulovou hodnotu na x-ové ose určíme podle následujícího vztahu.

$$\cos FI = \frac{\Delta X}{Y1 - Y2} = \frac{1}{0,2 + 0,1} = 3,3\bar{3} \quad \mathbf{9-1}$$

$$prunik = \cos FI * Y1 + k = 3,3\bar{3} * 0,2 + 4 = 4,6\bar{6}$$

Kde

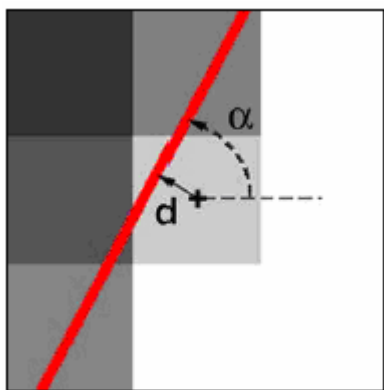
k.....je pozice prvního (kladného) vzorku na x-ové ose



Obr. 13. Průchod nulovou hodnotou

9.4 APROXIMACE DISKRÉTNÍCH HODNOT

Diskrétní hodnoty hrany obrazu jsou aproximovány křivkou tak, aby nejmenší kvadratická odchylka od těchto hodnot byla co nejmenší. Pokud je hledaná křivka přímka, potom se nabízí použití aproximace metodou nejmenších čtverců přímkou prvního řádu.



$$\sum_{i=1}^9 (p_i^{original} - p(d, a)_i^{estimated})^2 \xrightarrow{d, a} \min$$

9-2

Obr. 14: Sousedství 3x3 pixelů zobrazující hranu

10. PROGRAM

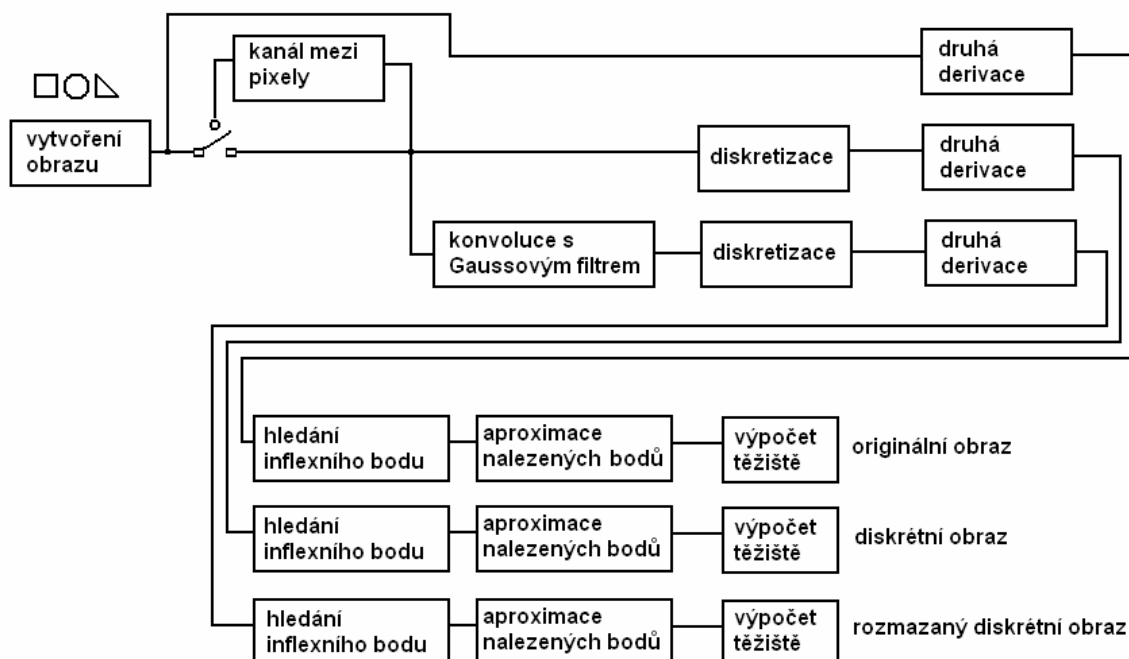
Podle zadání by měl být program schopen najít a změřit polohu těžiště objektů, kterými jsou kolečko, čtverec a trojúhelník. Poloha těžiště by měla být změřena s přesností větší než jeden pixel (subpixelová přesnost).

Program je vytvořen v prostředí MATLAB, využívající několik funkcí Toolboxu Image Processing. Pro lepší uživatelskou přehlednost a snazší ovládání je vytvořen ovládací panel, kde je možno volit, nebo nastavit všechny požadované parametry. Pro vytvoření ovládacího panelu je použit Guide (Graphical User Interfaces), což je editor v MATLABu umožňující vytvořit grafické uživatelské rozhraní.

Zjednodušené blokové schéma postupu od kroku vytvoření objektu až po výpočet jeho těžiště je na následujícím obrázku.

Proces se po vytvoření objektu dělí do tří paralelních větví. V první větvi je zpracováván originální snímek, v druhé části je obraz podstoupen digitalizaci a ve třetí části je před digitalizací originální snímek rozostřen Gaussovým filtrem.

V dalších krocích jsou obrazy podstoupeny stejným operacím, s rozdílem v nastavených parametrech daných funkcí. Největší rozdíly v nastavených parametrech se projevují, v krocích “aproximace nalezených bodů” a “výpočet těžiště”. To je dáno především přepočtem velikosti objektu před a po diskretizaci.

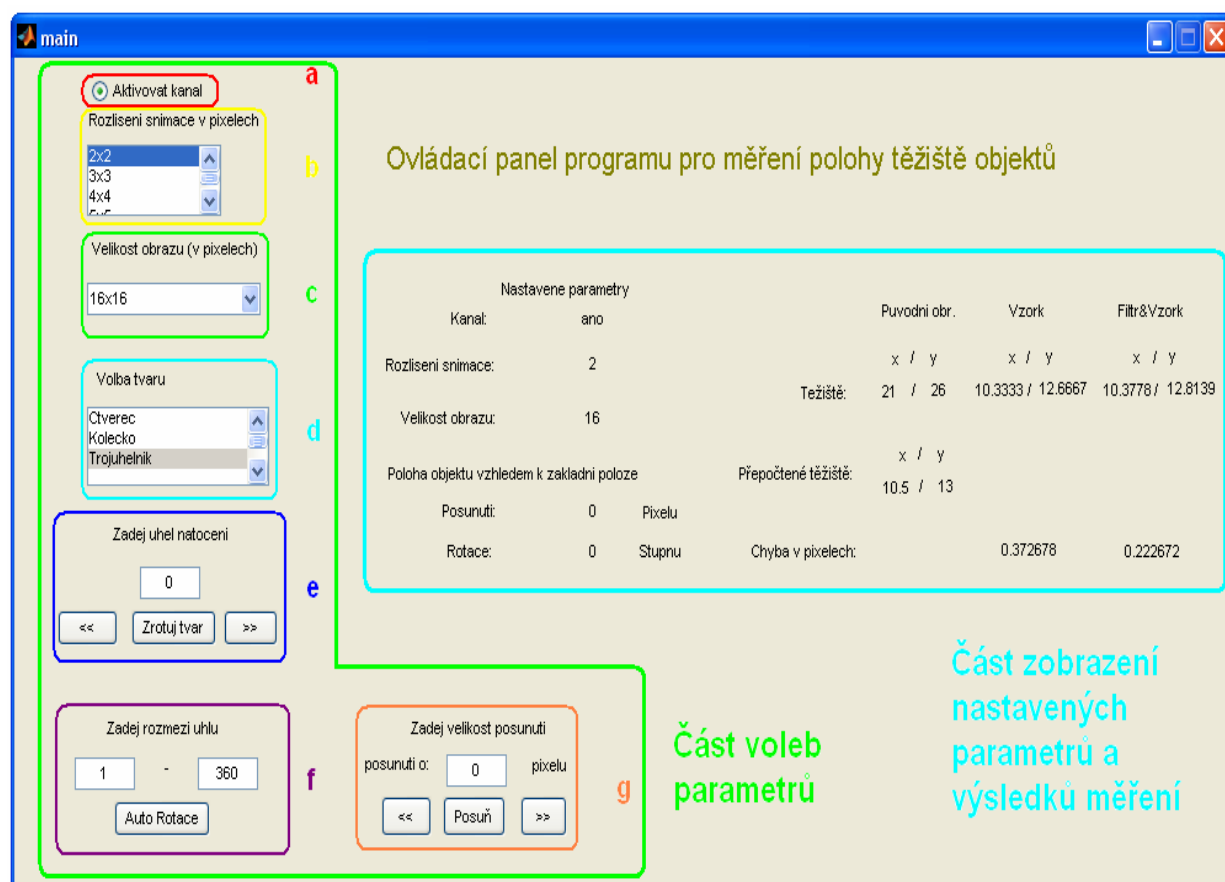


Obr. 15 Blokové schéma postupu zpracování obrazu

10.1 STRUKTURA PROGRAMU

Celý program je obsluhován z ovládacího panelu, který je vyobrazen na Obr. 16. Ovládací panel je rozdělen do dvou základních částí. První část, označena v zeleném rámečku je určena pro nastavení parametrů a spuštění procesu. V části označené tyrkysovou barvou jsou zobrazeny nastavené hodnoty, velikost posunutí nebo pootočení a polohy těžiště obrazů včetně jejich odchylky od originálu.

V zeleném rámečku, určeném pro volbu “velikost obrazu“, se volí velikost obrazu, který je považovaný za analogový. Proto poměr mezi touto velikostí a rozlišením by neměl být menší než osm, aby byl splněn požadavek na velikost výsledného objektu osm obrazových bodů



Obr. 16. Ovládací panel programu

První nastavitelnou položkou na ovládacím panelu je aktivace kanálu mezi jednotlivými pixely, defaultně nastaveno do stavu “ne“ (kanál není aktivován). V obrázku vyznačeno červeným rámečkem a písmenem “a“.

Další volitelnou položkou je volba velikosti rozlišení snímáče. Touto volbou se určí, z kolika pixelů originálního obrazu se bude počítat výsledná hodnota jasu pixelu snímáče, defaultně nastaveno na 4x4 pixely. Na obrázku vyznačeno žlutou barvou a písmenem “b“.

Pod zeleným písmenem “c” se nastavuje velikost zkoumaného objektu, defaultně nastavena velikost objektu 32x32 pixelů na originálním obrázku. Při nastavení rozlišení snímáče 4x4 pixely je velikost objektu na navzorkovaném obrázku 8x8 pixelů. Osm pixelů je minimální velikost hrany, na které se bude provádět operace hledání polohy hrany se subpixelovou přesností.

Pro rotaci objektu slouží tlačítka v modrém rámečku označeném písmenem “e”. Do editačního pole lze zadat žádanou hodnotu natočení a volbu potvrdit tlačítkem “Zrotuj tvar”. Tlačítka napravo a nalevo zvyšují, nebo snižují úhel natočení s krokem jedna při každém zmáčknutí. Tlačítkem “Auto rotace” je objekt otáčen automaticky v rozmezí úhlů, které jsou nastaveny uživatelem (fialový rámeček).

10.1.1 Funkce *main.m*

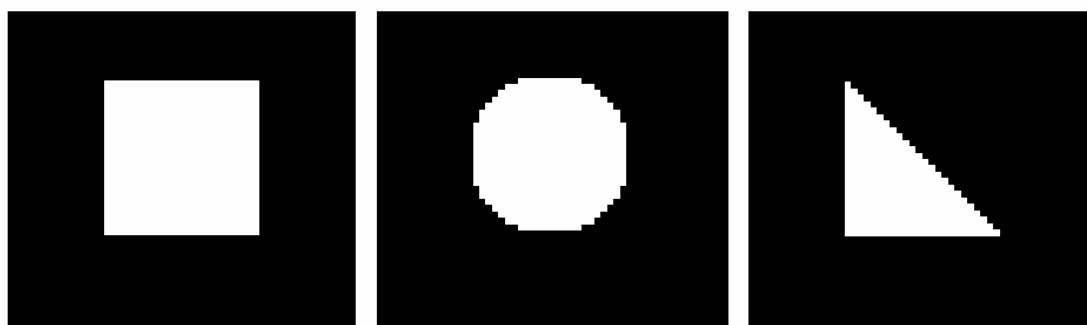
Pro spuštění celého programu je nutné spustit nejprve funkci *main.m*. Funkce *main.m*, je vygenerována programem MATLAB pro obsluhu uživatelského prostředí Guide. Jedná se o funkci na nejvyšší úrovni v hierarchii programu, ze které jsou volány ostatní funkce vytvořené pro obsluhu specifických operací.

10.1.2 Funkce generující objekty (*vzory.m*)

Podle zadání by program měl pracovat se třemi tvary objektů. Objekty jsou tvořeny funkcí *vzory.m*. Jedná se o objekty tvaru čtverec, kolečko a trojúhelník.

Vstupními parametry funkce *vzory.m* je kód udávající tvar objektu a velikost, jakou bude mít vygenerovaný objekt.

Výstupem funkce *vzory.m* je matice $M \times N$, složená z hodnot 0 a 255. Hodnoty 255 představují zkoumaný objekt, který má tvar dle předchozí volby.



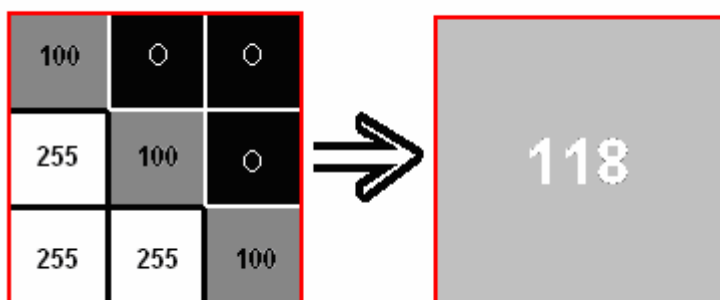
Obr. 17. Vygenerované objekty funkcí *vzory.m*

10.1.3 Funkce provádějící diskretizaci

(*pixelování.m*)

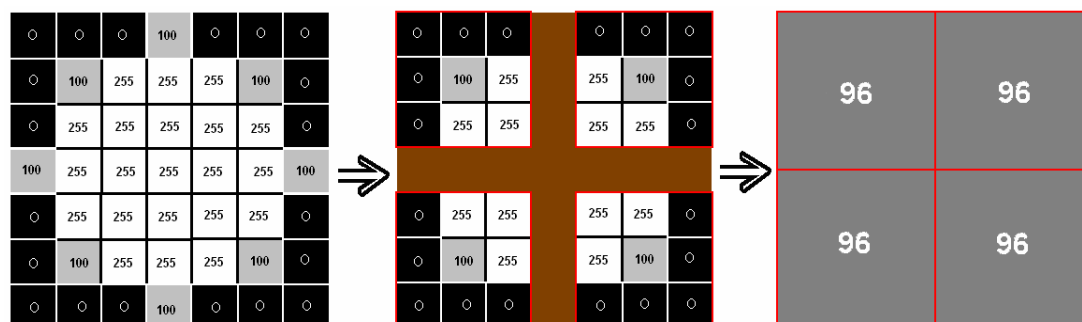
Podobně jako snímací čip zaznamenává reálnou scénu, tak i simulace tohoto procesu funkcí *pixelování.m*, převádí originální obraz vytvořený funkcí *vzory.m* do podoby představující diskretní obraz. Funkce má tři vstupní parametry. Prvním parametrem je originální obraz, dále pak rozlišení v jednotkách pixel a parametr udávající zda bude počítáno s kanálem mezi pixely či nikoli.

Samotná operace pixelování probíhá následujícím způsobem. Dle velikosti vstupního parametru, udávající velikost rozlišení, jsou zprůměrovány jasové hodnoty obrazových bodů originálního obrazu. Počet obrazových bodů původního obrazu, připadající na jeden pixel, je dán velikostí zadaného rozlišení.



Obr. 18. Navzorkování obrazu rozlišením 3x3, (velikost pixelu snímáče odpovídá 3x3 obrazovým bodům originálního obrazu)

V případě že je aktivován kanál, obrazové body původního obrazu, které dopadají právě na oblast kanálu, nejsou uvažovány do výsledné hodnoty jasu výsledného pixelu Obr. 19. Tyto hodnoty jsou nenávratně ztraceny. Na Obr. 9 je způsob řešení tohoto problému přidáním mikročoček na obrazový bod. Tento způsob využívají někteří výrobci snímačů.



Obr. 19. Diskretizace s kanálem

10.1.4 Rozmazání originálního obrazu

(*konvoluce.m*)

Při snímání reálné scény fotoaparátem či kamerou, musí světelný tok projít před dopadem na snímací čip, soustavou čoček aparátu. V reálném světě není žádná čočka dokonalá, a proto dochází průchodem světelného paprsku čočkou k jeho deformaci.

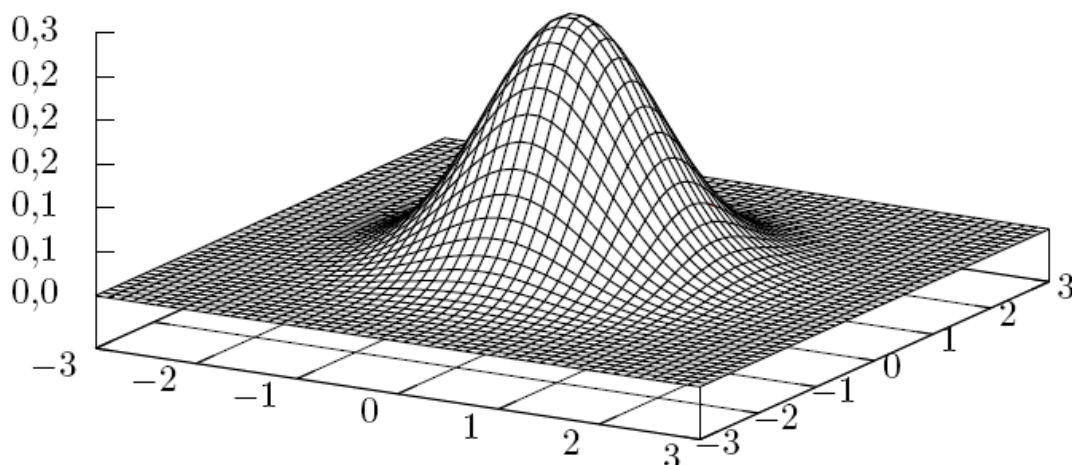
V programu je deformace paprsku čočkou nasimulována funkcí *konvoluce.m*. Funkce má pouze jeden vstupní a jeden výstupní parametr. Vstupem je obraz, který bude deformován, výstupem je deformovaný obraz. Jako vstup je použit originální obraz. Stejně jako při snímání reálné scény, prochází světelný tok představující snímanou scénu přes čočku aparátu a poté dopadá na jeho snímač.

Jako nejlépe simulující zkreslení paprsku objektivem se jeví Gaussův filtr. Graf Gaussova filtru je zobrazený na Obr. 20.

Aplikuje se na daný obraz konvolucí masky filtru přes celý obraz. Jeho konečný vliv na obraz po konvoluci je rozostření hran objektů.

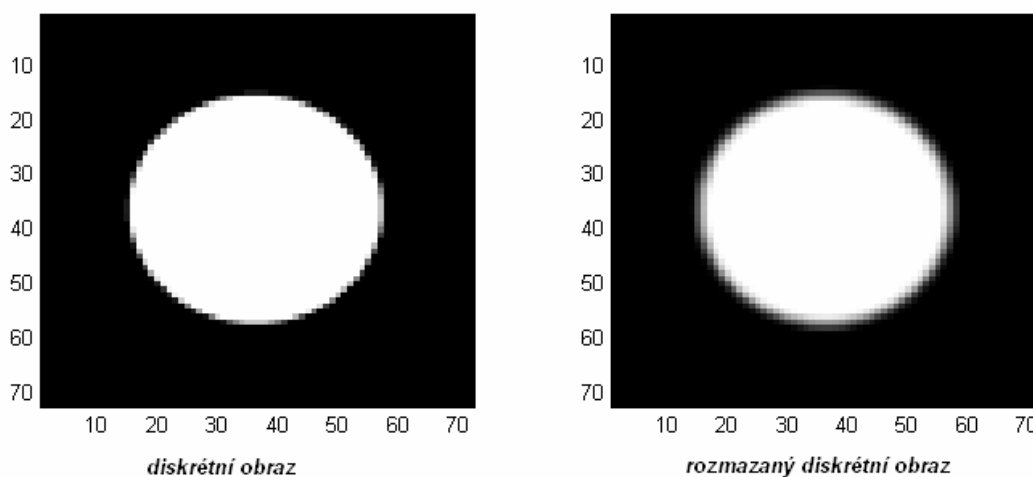
Příklad konvoluční masky Gaussova filtru.

$$H_G = \frac{1}{159} \begin{pmatrix} 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 5 & 12 & 15 & 12 & 5 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 2 & 4 & 6 & 4 & 2 \end{pmatrix}$$



Obr. 20. Gaussovo rozložení o rozptylu $\sigma = 0.75$

Jako příklad použití filtru je na Obr. 21 zobrazen objekt tvaru kolečka, který je v pravé části obrázku, rozmazaný Gaussovým konvolučním filtrem. Na obrázku je jasně zřetelné rozostření ostrých přechodů mezi jasovými úrovněmi.

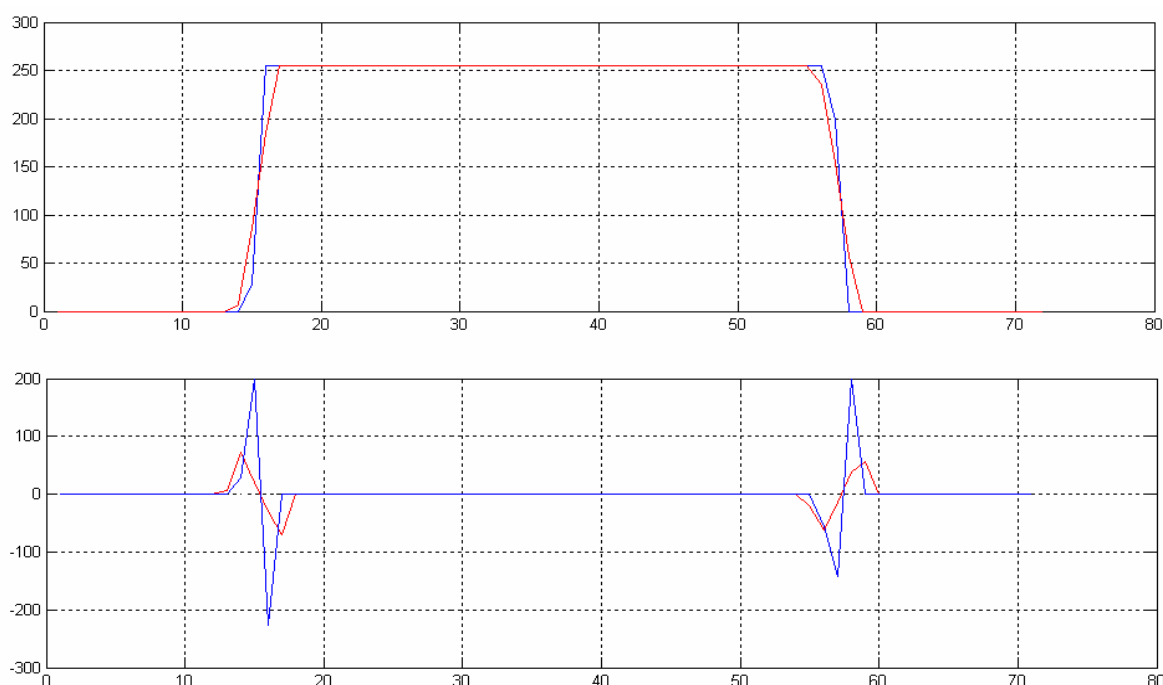


Obr. 21. Rozmazání Gaussovým filtrem

Pro jasnou představu, jak vypadá jeden řádek obrazové matice ostrého a rozostřeného obrazu, je vykreslen průběh jasových úrovní na Obr. 22. Na horním obrázku odpovídá modrá křivka jednomu řádku ostrého objektu, zatímco červená

křivka odpovídá rozostřenému objektu. Z obou průběhů je jasné viditelné rozmazání ostré hrany, způsobené Gaussovým konvolučním filtrem.

Druhé derivace obou průběhů jsou vykresleny na spodním obrázku. Průběh druhé derivace rozostřené hrany, má celkově nižší maxima a je více roztažen do stran. Co se týče polohy inflexních bodů, ty by neměly být tímto rozostřením nikterak ovlivněny, či posunuty a měly by ležet na stejném místě i po rozostření obrazu, což potvrzuje i spodní obrázek.



Obr. 22: Průběh ostré a rozmazané hrany (nahore), průběh jejich druhé derivace (dole)

10.1.5 Rozvětvení na funkce jednotlivých tvarů

Vzhledem k tomu, že všechny tři objekty mají rozdílný tvar, je třeba podle toho přizpůsobit přístup k nim. Každý jednotlivý tvar má svou hlavní funkci, která volá ostatní funkce dle potřeby a předává výslednou informaci o poloze těžiště objektu, nejvyšší funkci *main.m*. Funkce spravující jednotlivé tvary jsou nazvány *Ctvermain.m* pro čtverec, *Trojmain.m* pro trojúhelník a konečně *Kolomain.m* pro

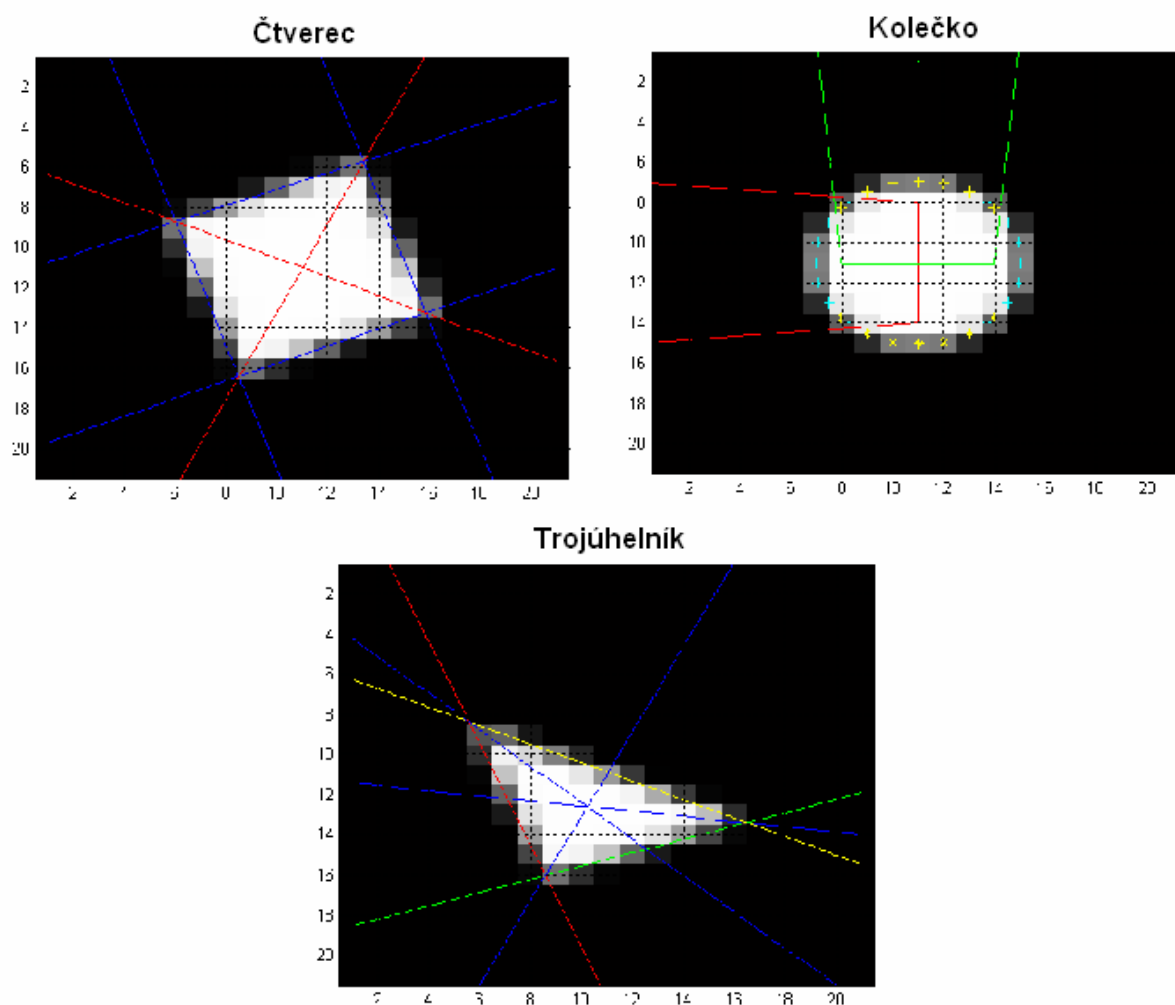
kolo. Všechny tři funkce mají v podstatě stejnou strukturu a volají stejné funkce. Jediný rozdíl je v tom, že volané funkce jsou přizpůsobeny svými parametry potřebám pro tvar objektu, pro který je funkce volána. Některé z nejdůležitějších funkcí jsou *AproxHoughem.m* a *LSM.m*, provádějící aproximaci hraničních bodů, nebo os objektů metodami Houghovy transformace a nejmenších čtverců.

10.2 HLEDÁNÍ POLOHY TĚŽIŠTĚ OBJEKTU

Pro porovnání vzájemné polohy objektů v obraze je použito umístění jejich těžiště. Těžištěm objektu je vyjádřena jeho poloha vůči jiným objektům.

Pro získání těžiště jakéhokoli objektu je nejprve nutné určit jeho osy. Těžiště je poté nalezeno v místě průniku os. Hrany jsou hledány ve dvou směrech, jeden směr je horizontální a druhý vertikální. Pro případ kolečka jsou hledány rovnou osy, zatímco v případě čtverce a trojúhelníku je třeba správně aproximovat strany, které určují rohy objektu. V bodech, kde se protínají sousední přímky, leží rohy objektů. Proložením protějších rohů jsou získány osy čtverce a jejich průnik určuje polohu těžiště. U trojúhelníku se hledá roh a polovina protější strany.

Všechny tři tvary, jejich nalezené strany a osy je možné vidět na Obr. 23. Ve všech třech případech se jedná o obraz, který byl rozostřen Gaussovým konvolučním filtrem a posléze prošel diskretizací tak, aby výsledná velikost kolmé hrany byla osm pixelů. To je minimální velikost hrany, se kterou bude v dalším počítat.



Obr. 23. Vykreslení nalezených stran a os do obrazu

Objekty mající tvar čtverce a trojúhelníku na obrázcích jsou otočeny os třicet stupňů. Vzhledem k pravidelnosti tvaru kolečka, nemá cenu na něm provádět rotaci, protože výsledné hodnoty by neměli příliš velkou vypovídací hodnotu.

S kolečkem bude provedena jiná operace a to taková, že s referenčním objektem bude posouváno o vzdálenost nula až sedm pixelů, s krokem jedna.

11. VÝSLEDKY

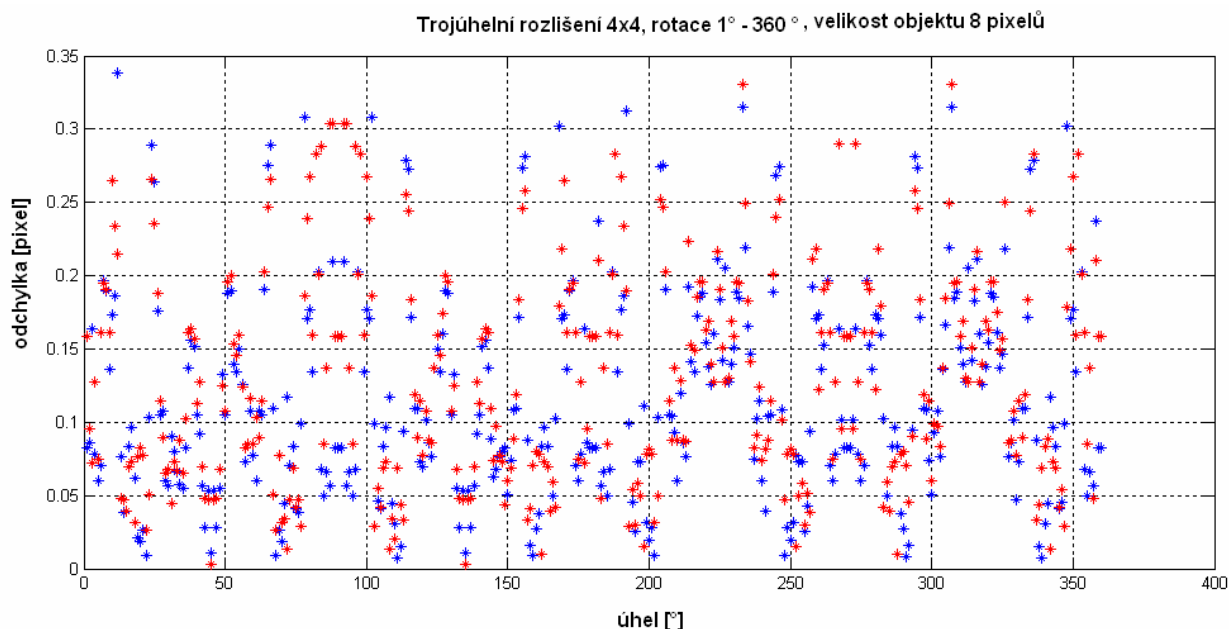
Jsou dány tři objekty, na kterých je třeba ověřit, s jakou přesností je možno určit jejich polohu těžiště. Se změnou několika parametrů, na kterých by mohla být přesnost závislá, bude pozorováno, do jaké míry daný parametr ovlivňuje přesnost určení polohy těžiště.

Prvním parametrem, majícím vliv na měření je velikost hrany, tím se myslí jak velký je pozorovaný objekt. Druhý parametr je velikost vzorkování, tedy kolik pixelů z originálního snímku bude zprůměrováno a převedeno jako jeden pixel výstupního obrazu. Další veličinou, na kterou je třeba zaměřit pozornost, je rozdíl naměřených hodnot u ostrého obrazu a obrazu rozmazaného konvolučním filtrem. Bude zajímavé pozorovat, jaký vliv má rozmazání na výslednou přesnost měření.

Posledním nastavitelným prvkem, který může ovlivnit výsledný údaj o poloze těžiště, je funkce, umožňující simulování kanálu pro vyčítání zaznamenaných dat ze snímače. Plocha, kterou zabírá kanál v jednom vzorku, bude simulována ve dvou velikostech, a to při velikosti vzorku 4x4, připadá na kanál sedm krajních pixelů z celkových šestnácti, což odpovídá 43.75 % z celkové plochy. Při velikosti vzorku 5x5 připadá na kanál devět krajních pixelů, odpovídající 36 % z celkové plochy vzorku.

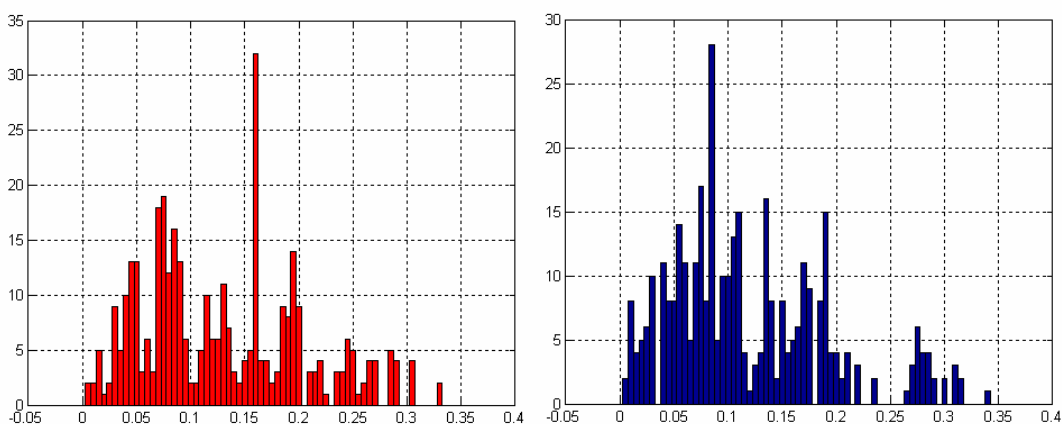
Obrazem je rotováno v rozmezí 1 až 360 stupňů. Pro každý úhel, je zaznamenána poloha těžiště všech třech objektů. První je referenční, se kterým budou porovnávány zbylé dva obrazy. Další obraz je zdiskretizovaný referenční obraz a poslední je rozostřený a následně zdiskretizovaný referenční obraz. Rotace bude provedena pro několik velikostí objektu.

Pro představu, body zobrazené na Obr. 24 udávají hodnoty odchylek pro tvar “trojúhelník”, při velikosti objektu osm pixelů, kterých bylo dosaženo při rozlišení 4x4. Každá hodnota odpovídá jednomu stupni. Modré tečky odpovídají ostrému obrazu, červené tečky rozmazanému.



Obr. 24. Rotace objektu od 1° do 360°

Histogram nejčastěji se vyskytujících hodnot odchylek je vykreslen na další obrázku. Pro rozmazaný obrázek se nejčastěji vyskytuje hodnota odchylky 0,16 pixelu, vyznačeno červeně. Pro ostrý obrázek je to 0,085 pixelu, vyznačeno modře. Průměrná odchylka je pro rozmazaný obraz 0,1295 pixelu, pro ostrý obraz je odchylka 0,1182 pixelu.



Obr. 25. Histogram odchylek. Rozmazaný červeně, ostrý modře.

Každý bod grafu je získán tím způsobem, že je spočítán průměr všech hodnot získaných rotací pro danou velikost objektu. Další bod grafu se získá stejným způsobem, jen velikost objektu se změní.

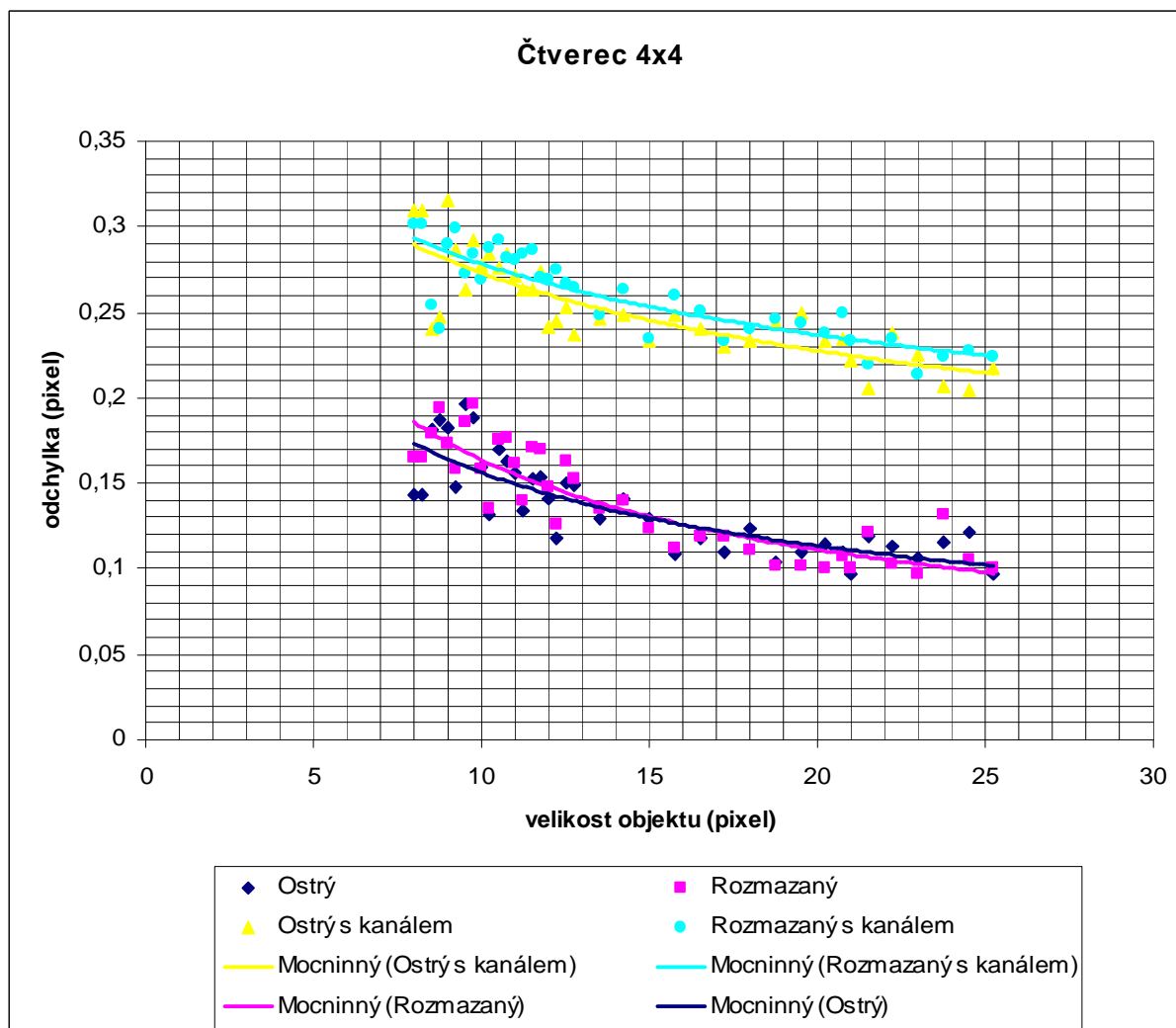
Na osách grafů, je na horizontální ose udána velikost objektu v jednotkách pixelů diskretizovaného obrazu. Vertikální osa značí velikost odchylky těžiště od polohy těžiště vzoru v jednotkách pixel diskretizovaného obrazu. To znamená, že v grafu je vykreslena závislost velikosti odchylky těžiště na velikosti objektu. Minimální velikost objektu, na kterém se bude provádět měření je osm pixelů.

11.1 ČTVEREC

Tečky v grafu udávají hodnoty odchylky pro danou velikost objektu. Křivky odpovídají mocninnému proložení zobrazených hodnot. Křivky proložení, barevně korespondují s množinou bodů, které prokládají.

Rozlišení 4x4

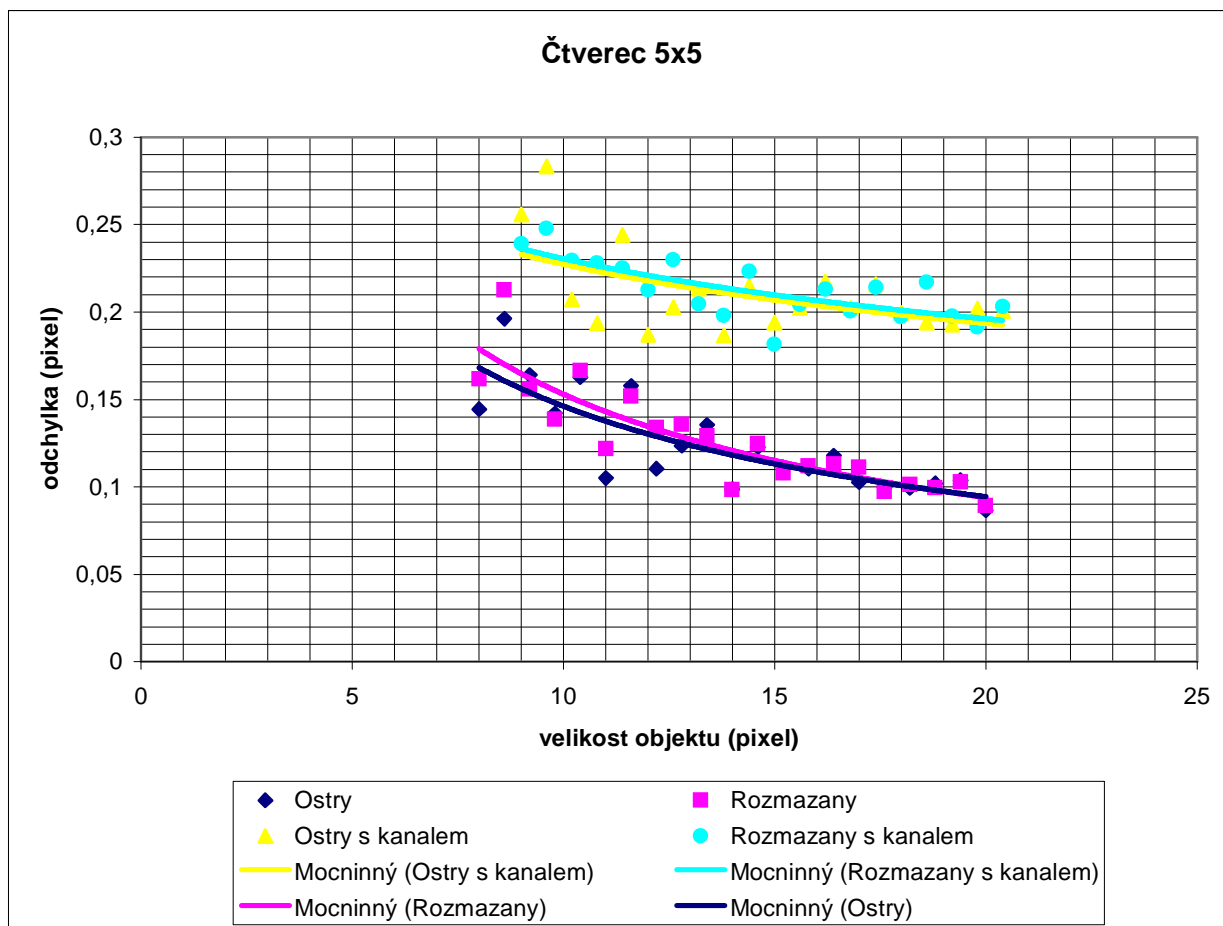
Obr. 26 jsou vykresleny průběhy odchylek pro čtverec při rozlišení 4x4 pixely. V legendě obrázku je vypsáno, jaké barvy odpovídají jakým průběhům.



Obr. 26. Čtverec, rozlišení 4x4 pixely

11.1.1 Rozlišení 5x5

Graf pro objekt čtverec vzorkovaný rozlišením 5x5 pixelů



Obr. 27. Čtverec, rozlišení 5x5 pixelů

V tabulce jsou vypsány průměrné hodnoty, odpovídající hodnotám v grafu

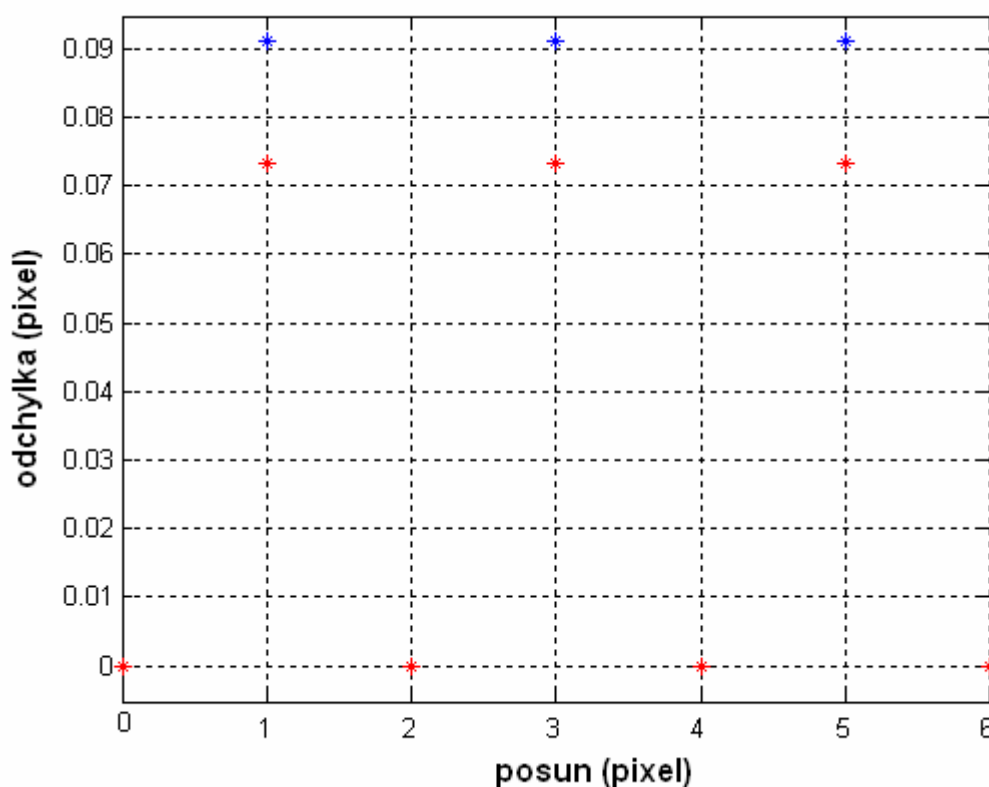
Tab. 1: Průměrné odchylky pro Čtverec

Průměrné hodnoty odchylek pro čtverec [pixel]							
4x4 Bez kanálu		4x4 S kanálem		5x5 Bez kanálu		5x5 S kanálem	
Ostrý	0,163025	Ostrý	0,252419	Ostrý	0,123656	Ostrý	0,210468
Rozmazaný	0,140131	Rozmazaný	0,259434	Rozmazaný	0,126874	Rozmazaný	0,212811

11.2 KOLEČKO

Vzhledem k tvaru kolečka, nemá smysl, sním provádět rotaci. Místo rotace se bude kolečkem posouvat. Jde o to, si uvědomit, že pokud je daný objekt v horizontální i vertikální ose symetrický a jeho světelné paprsky dopadnou ideálním způsobem na vzorkovací mřížku, je možné určit polohu těžiště se stoprocentní přesností.

Výsledky takového stavu jsou vidět na Obr. 28. Jsou na něm vyznačeny hodnoty odchylek pro objekt tvaru kolečka, který má velikost osm pixelů. Z hodnot vykreslených v obrázku je možné pozorovat, jak se periodicky střídají hodnoty odchylek. V případě, že se objekt ideálně kryje se vzorkovací mřížkou, je výsledná odchylka nulová. Tento stav je pouze ideální.

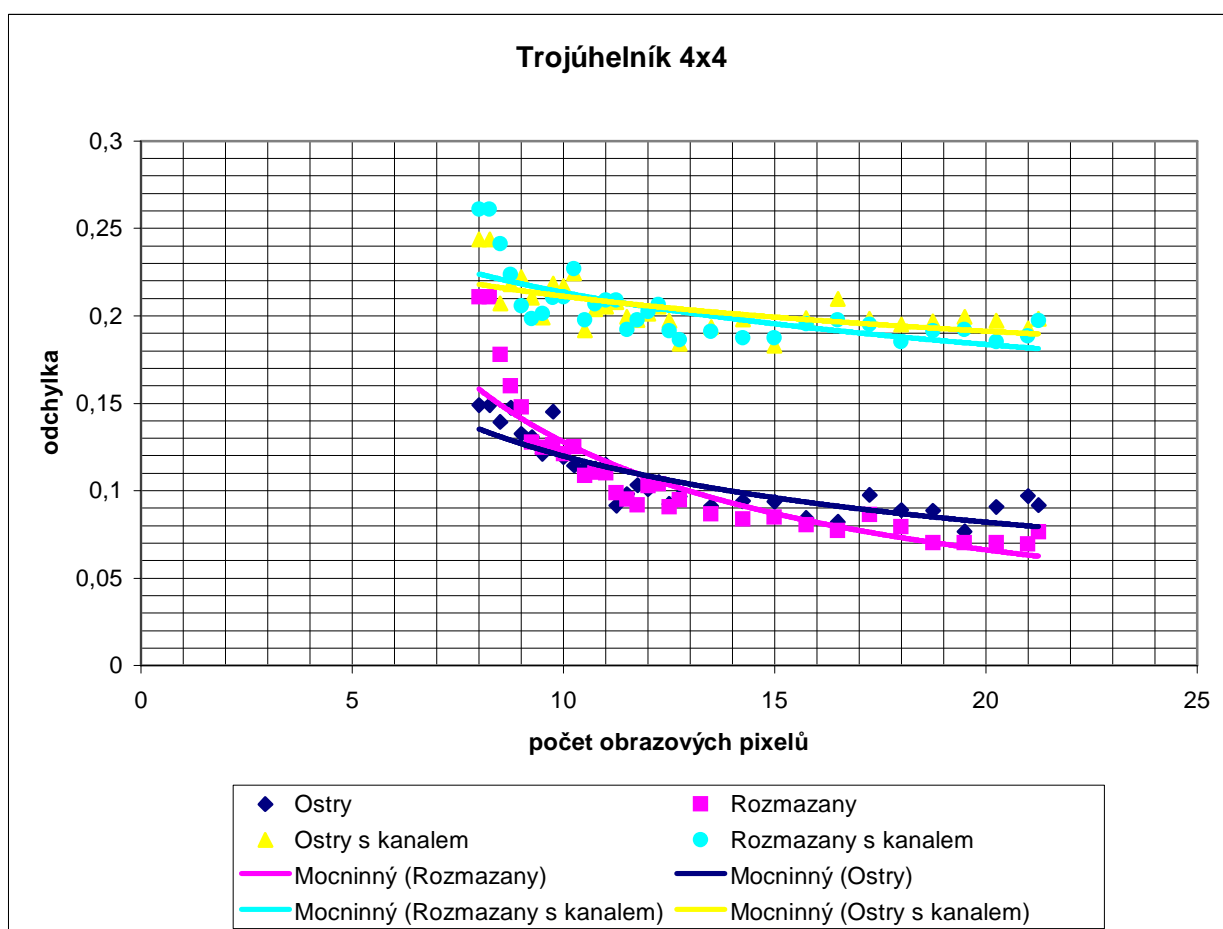


Obr. 28. Posun kolečka o vzdálenost 0 – 6 pixelů

11.3 TROJÚHELNÍK

Tečky v grafu udávají hodnoty odchylky pro danou velikost objektu. Křivky odpovídají mocninnému proložení zobrazených hodnot. Křivky proložení, barevně korespondují s množinou bodů, které prokládají.

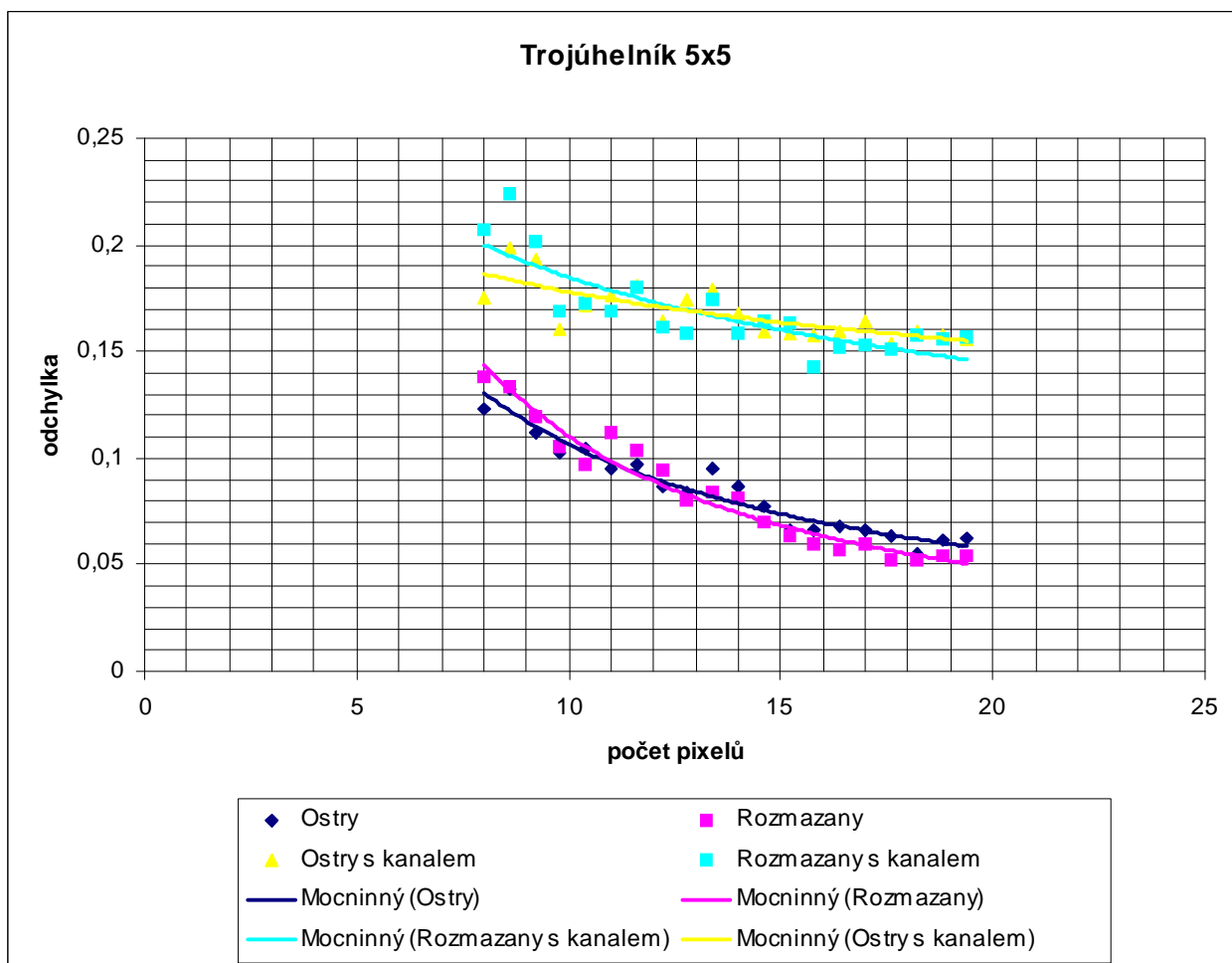
11.3.1 Rozlišení 4x4



Obr. 29. Trojúhelník, rozlišení 4x4 pixelů

11.3.2 Rozlišení 5x5

Graf pro objekt trojúhelník vzorkovaný rozlišením 5x5 pixelů.



Obr. 30. Trojúhelník, rozlišení 5x5 pixelů

V tabulce jsou vypsány průměrné hodnoty odpovídající hodnotám v grafu

Tab. 2: Průměrné odchylky pro Trojúhelník

Průměrné hodnoty odchylek pro trojúhelník [pixel]							
4x4 Bez kanálu		4x4 S kanálem		5x5 Bez kanálu		5x5 S kanálem	
Ostrý	0,107891	Ostrý	0,204971	Ostrý	0,083881	Ostrý	0,167545
Rozmazaný	0,108551	Rozmazaný	0,204093	Rozmazaný	0,081869	Rozmazaný	0,167427

12. ZÁVĚR

V tabulkách Tab. 1 a Tab. 2 jsou vypsány průměrné hodnoty odchylek těžiště v závislosti na velikosti zkoumaného objektu. Tabulky jsou rozděleny do skupin, ovlivňující nejvíce výsledné hodnoty.

Podle průběhů proložených bodů v grafech a hodnot, vynesných do tabulek, není možné jasně říci, zda má rozmazání negativní či pozitivní vliv na přesnost určení polohy těžiště. Průběhy křivek, kterými jsou proloženy body v grafech, si do velké míry odpovídají a nijak zásadně se od sebe neoddalují. Tento závěr potvrzují i hodnoty zapsané v tabulkách, kde se velikosti odchylek pro proměnnou „*Ostrý*“ a „*Rozmazaný*“ ve skupinách „*Bez kanálu*“ a „*S kanálem*“ shodují, ve většině případů až ve dvou řádech za desetinou čarou. Z dosažených poznatků lze říci, že rozmazání obrazu daným konvolučním filtrem, nemá zásadní vliv na přesnost určení těžiště objektů.

Zásadní vliv na přesnost nalezení těžiště, má podle předpokladu velikost zkoumaného objektu. Pro objekty, jejichž velikost hrany byla rovna osmi pixelům, je přesnost nejhorší. Se zvyšující se velikostí objektu, klesá odchylka přibližně po mocninné regresní křivce, které odpovídá rovnice $y = a \cdot x^b$.

Při velikosti objektu zhruba osmnácti pixelů se odchylka ustaluje a mění se jen hodně pozvolna. Nejstrmější změna odchylky se projevuje ve velikosti objektu od osmi do jedenácti pixelů. To je způsobeno tím, že při vypuštění krajních chybných pixelů zbývá pro aproximaci kolmé hrany pouhých šest bodů a při rotaci objektu se toto číslo může ještě snížit. Proložení tak málo bodů, může při jedné odchýlené hodnotě ovlivnit výslednou strmost, či posun aproximační přímkou.

Dosažené přesnosti měření, kterých bylo dosaženo při ustálených hodnotách, se pohybují kolem jedné desetin pixelu, pro rozlišení bez použití kanálu. Při rozlišení s použitým kanálem je chyba téměř dvojnásobná od hodnot bez kanálu.

V případě, kdy je rozlišení větší, kanál zabírá menší celkovou snímanou plochu a ve výsledku je při vyšším rozlišení rozdíl mezi hodnotami s kanálem a bez kanálu menší.

Další vliv na přesnost má i tvar objektu. Čtverec má oproti trojúhelníku o jednu stranu víc. Na každé straně se při hledání hrany vyskytne chyba, tyto chyby se ve výsledné poloze těžiště sečtou.

13. LITERATURA

- [1] Hlaváč, V., Šonka, M. (1992). Počítačové vidění. Grada, Praha
- [2] Hlaváč, V. *Hledání hran*
<http://cmp.felk.cvut.cz/~hlavac/TeachPresCz/11DigZprObr/22DetekceHran.pdf>
- [3] Vernon, D. Machine Vision. New York: Prentice Hall, 1991. 255 p. ISBN 0-13-543398-3.
- [4] Hozman, J. Základní metody předzpracování obrazu. UBMI ČVUT v Praze.
- [5] Horák, K., Kalová, I., Petyovský, P., Richter, M. Počítačové vidění.
VUT Brno 2007
- [6] Fiřt, J., Holota, R. Digitalizace a zpracování obrazu
- [7] Wikipedia, The free encyclopedia, *Hough Transform*
(http://en.wikipedia.org/wiki/Hough_transform)